RANGKAIAN ELEKTRONIKA ANALOG

COPY

COPY

KATA PENGANTAR

COPY

Rangkaian Elektronika Analog pada prinsipnya adalah analisis dan sintesis rangkaian dengan op amp (*operational amplifier*) yang meliputi analisis dan sintesis op amp pada rangkaian *open loop* yaitu sebagai rangkaian detektor, analisis dan sintesis op amp pada rangkaian *close loop* dengan umpan balik negatif sebagai penguat (*amplifier*), analisis dan sintesis op amp pada rangkaian *close loop* dengan umpan balik positif sebagai pembanding (*comparator*), analisis dan sintesis op amp pada rangkaian *close loop* dengan umpan balik positif dan negatif pada rangkaian pembangkit sinyal (*signal generator*), rangkaian op-amp dengan dioda, analisis dan sintesis op amp sebagai penyaring (*filter*), analisis op amp dengan parameternya yaitu parameter DC dan parameter AC. Metode analisis rangkaian yang digunakan mirip dengan rangkaian listrik yaitu analisis DC, analisis gejala peralihan (*transient*) untuk sistem orde satu dan sistem orde dua, analisis rangkaian AC atau fungsi sinusoida. Buku Rangkaian Elektronika Analog ini disertai banyak contoh soal tentang analisis dan sintesis rangkaian serta latihan soal. Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada Ir. Tasripan, M.T. yang telah mencoba semua rangkaian yang ada di dalam buku ini dengan hasil yang baik. Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada teman dosen sejawat yang mengajar Rangkaian Elektronika Analog yaitu Ir. Hendra Kusuma, M.Eng.Sc., Suwito, S.T., M.T., dan Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T. (selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITS periode 2011-2015). Kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan buku ini akan penulis terima dengan senang.

Penulis,

Pujiono

COPY

DAFTAR ISI

COPY

Kata Pengantar iii

Daftar Isi v

BAB 1 Pendahuluan 1

1.1 Pendahuluan 1
1.2 Terminal/Kaki Op-Amp 2
1.3 Penguatan Tegangan Untaian Terbuka (Aol atau *Open Loop Gain*) 4
1.4 Kesimpulan 5
1.5 Op-Amp Ideal 6
1.6 Detektor Penyilang-Nol (*Zero Crossing Detector*) 6
1.7 Siklus Kerja (*Duty Cycle*) 6
1.8 Karakteristik *Input-Output* 7
1.9 Detektor Penyilang-Nol (*Zero Crossing Detector*) 7
1.10 Rangkaian Tegangan Referensi (Vref) 11

BAB 2 Rangkaian Penguat (*Amplifier*) 19

2.1 Pendahuluan 19
2.2 Rangkaian Penguat Pembalik (*Inverting Amplifier*) 19
2.3 Pengikut Tegangan (*Voltage Follower*) 26
2.4 Rangkaian Penguat Tak Membalik (*Non inverting Amplifier*) 27
2.5 Rangkaian Penjumlah Tak Membalik (*Non Inverting Adder*) Dua Masukan 28
2.6 Penjumlah Tak Membalik N-Masukan 29
2.7 Penguat Selisih (*Differential Amplifier*) 30
2.8 Penguat Instrumentasi (*Instrumentation Amplifier*) 31

2.9 Penguat Logaritma (*Logaritmic Amplifier*) 32
2.10 Rangkaian Integrator 33
2.11 Rangkaian Differentiator 34

BAB 3 Rangkaian Pembanding (*Comparator*) 41

3.1 Pendahuluan 41
3.2 Detektor Pembalik Penyilang Nol dengan Histerisis (Inverting Zero Crossing Detector With Hysterisis atau IZCD With Hysterisis) 42
3.3 Detektor Tak Membalik Penyilang Nol dengan Histerisis (Non-Inverting Zero Crossing Detector With Hysterisis) 45
3.4 Detektor Pembalik Taraf Tegangan dengan Histerisis (*Inverting Voltage Level Detector With Hysterisis*) 48
3.5 Detektor Tak Pembalik Taraf Tegangan dengan Histerisis (*Non-Inverting Voltage Level Detector With Hysterisis*) 52
3.6 Detektor Jendela (*Windows Detector*) 61

BAB 4 Pembangkit Sinyal (*Signal Generator*) 67

4.1 Pembangkit Gelombang Persegi (Astable Multivibrator) 67
4.2 Multivibrator Satu Tembakan (One Shot Multivibrator) 79
4.3 Pembangkit Gelombang Tanjakan (Ramp Generator) 83
4.4 Pembangkit Gelombang Segitiga (*Triangle Wave Generator*) 84
4.5 Pembangkit Gelombang Segitiga dengan *Duty Cycle* Tidak Sama dengan 50% 88
4.6 Pembangkit Gelombang Gigi-Gergaji (*Saw Thoot Wave Generator*) 91
4.7 Osilator Gelombang Sinus (*Oscillator*) 93

BAB 5 Rangkaian Op Amp dengan Dioda 101

5.1 Penyearah Gelombang Setengah Linear (*Linear Half Wave Rectifier*) 101
5.2 Penyearah yang Presisi (Rangkaian Harga Mutlak) 105
5.3 Pendeteksi Puncak (*Peak Detector*) 107
5.4 Pengubah AC ke DC (*AC to DC Converter*) 108

BAB 6 Perencanaan Filter Aktif 111

6.1 LPF (*Low Pass Filter*) 112
6.2 HPF (*High Pass Filter*) 127
6.3 BPF (*Band Pass Filter*) 142
6.4 BSF/BEF/Notch Filter 154

COPY

BAB 7 Parameter Op-Amp Mode DC (Arus Bias, Arus Offset, Tegangan Offset, Arus Drift) 163

7.1 Pendahuluan 163
7.2 Arus Bias Masukan (*Input Bias Current*) 164
7.3 Arus Offset Masukan (*Input Offset Current*) 164
7.4 Efek Arus Bias pada Tegangan *Output* 164
7.5 Efek Arus Offset pada Tegangan *Output* 166
7.6 Tegangan Offset Masukan 168
7.7 Mengenolkan Tegangan Offset dan Arus Bias 170
7.8 Drift 170
7.9 Pengukuran Tegangan Offset dan Arus Bias 172

BAB 8 Parameter Op-Amp Mode AC (Lepar Pita (*Bandwidth*), Laju Ubah (*Slew Rate*), Gangguan (*Noise*), Kompensasi Frekuensi (*Frequency Compensation*)) 175

8.1 Pendahuluan 175
8.2 Tanggapan Frekuensi (*Frequency Response*) dari Op-Amp 175
8.3 Gain Penguat dan Tanggapan Frekuensi (*Frequency Response*) 177
8.4 Laju Ubah (*Slew Rate*) 180
8.5 Pembatasan Laju Ubah (*Slew Rate*) untuk Gelombang Sinus 181
8.6 Gangguan dalam Tegangan *Output* 181
8.7 Kompensasi Frekuensi Luar 183

Daftar Pustaka 187
Tentang Penulis 188

COPY

COPY

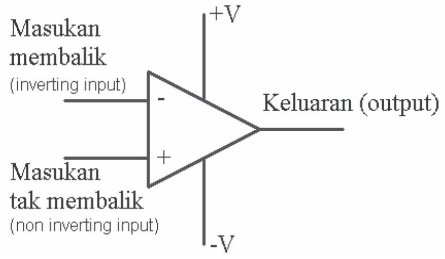
BAB 1

Pendahuluan

COPY

1.1 Pendahuluan

Nama penguat operasional (*operational amplifier*) diberikan kepada penguat dengan penguatan tinggi, yang dirancang untuk melaksanakan tugas matematis seperti penjumlahan, pengurangan, perkalian, pembagian. Penemuan op amp dalam bentuk IC (*integrated circuit*) mempunyai tegangan operasi yang rendah, harganya murah, mudah diganti-ganti, dapat diandalkan. Dengan sifatnya tersebut, op amp dapat digunakan dalam bidang pengontrolan proses, komunikasi, komputer, pembangkit sinyal, sistem peraga, pengukuran, dan sistem pengujian. Op amp secara rangkaian diskrit terdiri dari banyak komponen resistor, kapasitor, transistor yang membentuk rangkaian menjadi satu kesatuan dalam satu buah IC. Untuk menggunakan op amp tidak perlu tahu dalamnya op amp, tetapi hubungan komponen luar dengan sebuah op amp. Op amp mempunyai 5 terminal/pin: dua terminal untuk suplai daya (*power supply*), dua terminal untuk masukan (*input*) sinyal, 1 terminal untuk keluaran (*output*). Simbol daripada op amp adalah sebuah segitiga sama kaki yang mempunyai 5 terminal.

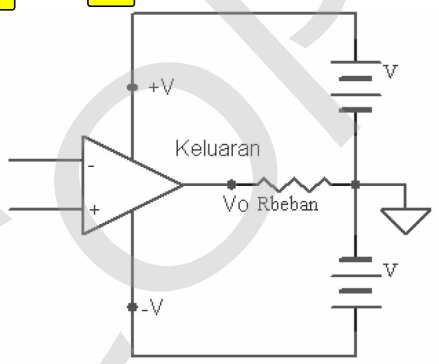


Gambar 1.1 *Simbol Op amp*

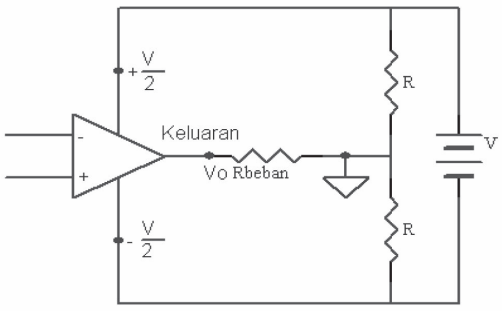
1.2 Terminal/Kaki Op-Amp

1.2.1 Terminal/Kaki Suplai Daya (*Power Supply*)

Pada Op-Amp terminal/kaki suplai daya (*power supply*) tegangan ada dua yaitu untuk tegangan positif (+V) dan tegangan negatif (-V). Tegangan ini bersifat split atau bipolar yaitu positif dan negatif. Tegangan suplai pada Op-Amp biasanya + 12 vo 15 vo 18 volt.

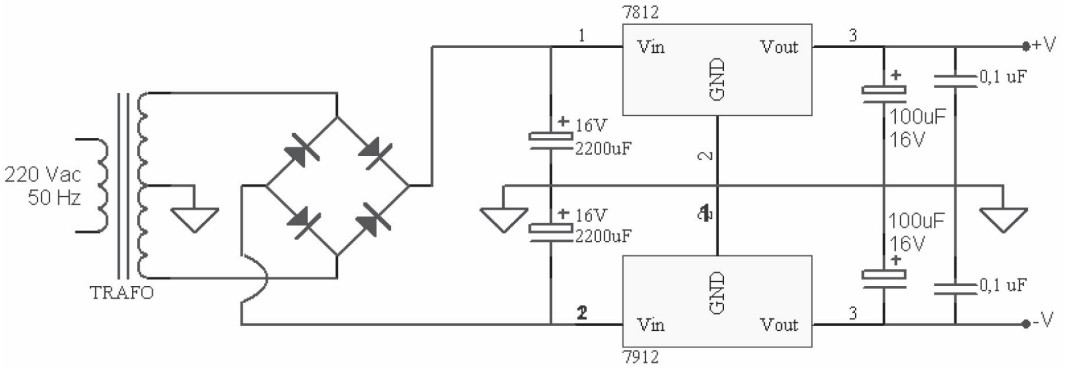


Gambar 1.2 *Cara memberi daya dengan 2 buah baterai*

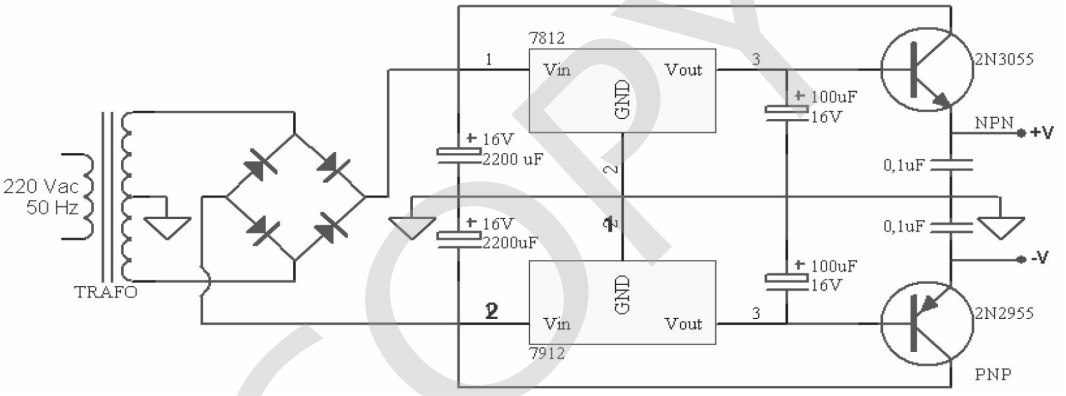


Gambar 1.3 *Cara memberi daya dengan 1 buah baterai*

COPY



Gambar 1.4 *Cara memberi daya dari sumber listrik ac*



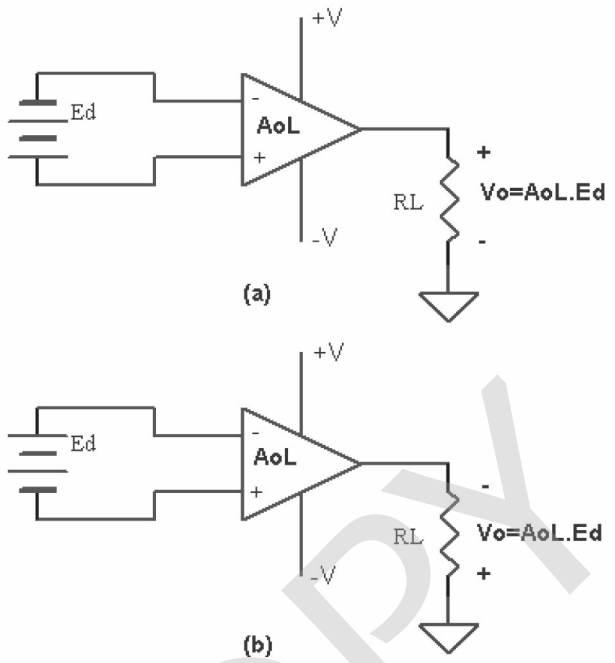
Gambar 1.5 *Adaptor bipolar menggunakan transistor daya untuk arus yang besar*

1.2.2 Terminal/Kaki Keluaran (*Output*)

Pada Op-Amp, terminal/kaki keluaran (*output*) ada satu yaitu Vo. Tegangan *output* pada Op-amp ada batas maksimumnya atau tegangan jenuh maksimum (positif saturasi) atau (+Vsat) dan ada batas minimumnya atau tegangan jenuh minimum (negatif saturasi) atau (-Vsat). Tegangan saturasi pada Op-Amp biasanya dinyatakan dalam bentuk $\pm$Vsat = $\pm$10 volt atau $\pm$Vsat = $\pm$14 volt. Tegangan saturasi biasanya di bawah tegangan suplai antara 1 sampai 2 volt.

$\pm$ V = $\pm$15 volt maka $\pm$Vsat = $\pm$14 volt atau $\pm$V= $\pm$12 volt maka $\pm$Vsat = $\pm$10 volt.

COPY



Gambar 1.6 *Polaritas Vo tergantung polaritas Ed (a) Ed positif maka Vo positif (b) Ed negatif maka Vo negatif*

1.2.3 Terminal/Kaki Masukan (*Input*)

Pada Op-Amp, terminal/kaki masukan (*input*) ada dua yaitu *positive input* atau *noninverting input* (masukan tak membalik) yang masuk pada kaki bertanda + (positif) dan *negative input* atau *inverting input* (masukan pembalik) yang masuk pada kaki bertanda – (negatif). Tegangan masukan (*input*) bersifat selisih atau *differential* (Ed) yaitu split antara positif dan negatif. Perbedaan tegangan antara kedua terminal masukan dinamakan Ed (tegangan selisih atau *differential*) yaitu masukan (+) – masukan (-) atau ditulis

Ed = tegangan pada masukan (+) – tegangan pada masukan (-). (1.1)

Hasil daripada pengurangan ini akan mengakibatkan polaritas Ed menjadi negatif atau positif. Tegangan *output* (Vo) merupakan perkalian Ed dengan AoL (penguatan *open loop*) dari op amp sehingga polaritas dari Vo tergantung dari polaritas Ed dan dapat ditulis menjadi

$Vo = E_d.A_{OL}$.

Sifat penting dari terminal masukan adalah mempunyai impedansi *input* yang tinggi.

1.3 Penguatan Tegangan Untaian Terbuka (Aol atau *Open Loop Gain*)

1.3.1 Definisi AoL

Pada Gambar 1.6 jika perbedaan tegangan masukan (Ed) cukup kecil maka tegangan Vo akan ditentukan dengan perkalian Ed dan penguatan *open loop* (AoL) atau

COPY

$Vo = E_d.A_{OL}$. (1.2)

AoL dinamakan penguatan atau gain untaian terbuka karena hubungan umpan balik antara terminal *output* dengan terminal *input* dibiarkan terbuka.

1.3.2 Perbedaan Tegangan Masukan

Nilai AoL besar sekali, sering 200.000 atau lebih. Tegangan keluaran (Vo) tidak pernah melebihi tegangan saturasi. Apabila op amp bekerja sebagai penguat maka Ed harus dibatasi sampai suatu tegangan maksimum sebesar $\pm 65\mu V$. Kesimpulan ini dicapai dari persamaan $Vo = E_d.A_{OL}$. Misalkan sebuah op amp mempunyai AoL = 200.000, $\pm$V = $\pm$15 volt dan $\pm$Vsat = $\pm$13 volt maka

$$Ed_{mak} = \frac{+Vsat}{A_{OL}} = \frac{+13V}{200.000} = 65\mu V$$

$$Ed_{min} = \frac{-Vsat}{A_{OL}} = \frac{-13V}{200.000} = -65\mu V$$

Apabila tegangan masukan berada antara $-65\mu V \leq$ Ed $\leq 65\mu V$ maka op amp berlaku sebagai penguat secara linear dan berlaku $Vo = E_d.A_{OL}$. Apabila tegangan masukan Ed berada pada Ed $\leq -65\mu V$ atau Ed $\leq 65\ \mu V$ maka rumus $Vo = E_d.A_{OL}$ tidak berlaku.

1.4 Kesimpulan

Ada tiga kesimpulan yang ditarik, yaitu *pertama* bahwa tegangan *output* (Vo) berada di salah satu batas-batas +Vsat atau –Vsat atau berada pada tegangan antara –Vsat dan +Vsat. *Kedua* untuk mempertahankan Vo tetap berada pada batas-batas ini maka dipasang umpan balik. *Ketiga* karena Ed nilainya kecil dan tak mudah untuk mengukurnya maka untuk kepentingan praktis Ed sama dengan 0. Untuk memudahkan analisis dan perencanaan maka apabila rangkaiannya untaian terbuka (*open loop*) maka jika polaritas Ed = negatif maka Vo = –Vsat dan jika Ed = positif maka Vo = +Vsat.

Tabel 1.1 *Hubungan tegangan output dengan tegangan input*

Tegangan pada masukan (-)	Tegangan pada masukan (+)	Ed	Polaritas Ed	Vo teoretis Vo = AoL.Ed	Polaritas Vo	Vo
-10 uV	-15 uV	-5 uV	-	-1.0 V	-	-1 V
-10 uV	+15 uV	25 uV	+	5.0 V	+	5 V
-10 uV	-5 uV	5 uV	+	1.0 V	+	1 V
+1.000001 V	+1.000000 V	-1 uV	-	-0,2 V	-	-0,2 V
+5 mV	0 V	-5 mV	-	-1.000 V	-	-Vsat = -13 V
0 V	+ 5 mV	5 mV	+	1.000 V	+	+Vsat = +13V

COPY

1.5 Op-Amp Ideal

Untuk mempermudah dalam melakukan analisis dan desain rangkaian dengan menggunakan op amp maka op amp dianggap ideal. Op amp ideal mempunyai sifat-sifat sebagai berikut.

1. Op amp mempunyai penguatan (*gain*) untaian terbuka (AoL) tak terhingga,
2. Impedansi masukan (*input*) tak terhingga,
3. Impedansi keluaran (*output*) sama dengan nol,
4. Lebar bidang frekuensi (*Bandwidth*) sama dengan tak terhingga,
5. Arus bias masukan (*input bias current*) sama dengan nol,
6. Tegangan *offset* (penyetelan tegangan) pada keluaran (*output*) sama dengan nol,
7. Tegangan selisih masukan (*differential input voltage Ed*) sama dengan nol.

1.6 Detektor Penyilang-Nol (*Zero Crossing Detector*)

Penggunanan pertama dari op amp adalah sebagai rangkaian detektor. Rangkaian detektor dinamakan juga sebagai pembanding yaitu membandingkan suatu tegangan masukan (*input*) pada salah satu kaki/pin masukan dengan suatu level tegangan tertentu atau dengan nol pada kaki/pin masukan lainnya. Hasil pembandingan ini dengan menggunakan rumus Ed sehingga didapatkan tegangan keluaran (*output*) yang tergantung dari polaritas Ed. Jika polaritas Ed sama dengan negatif maka tegangan *output* (Vo) sama dengan -Vsat dan jika polaritas Ed sama dengan positif maka tegangan Vo sama dengan +Vsat. Rangkaian detektor merupakan rangkaian yang bersifat *open loop* (untaian terbuka) karena antara tegangan *output* tidak ada umpan balik ke sisi masukan dan perubahan tegangan *output* (Vo) dari +Vsat ke –Vsat atau sebaliknya terjadi pada Ed = 0.

1.7 Siklus Kerja (*Duty Cycle*)

Siklus kerja atau *duty cycle* biasa disingkat DC adalah perbandingan waktu tinggi (waktu positif) dengan periode sinyal dan dikalikan dengan 100%. Secara matematis ditulis sebagai:

$$DC = \frac{t_H}{t_L + t_H} \times 100\% = \frac{tH}{T} \times 100\% \qquad (1.3)$$

Di mana: DC adalah *duty cycle* dalam persen.
tH = waktu positif atau waktu high (*high time*) satuannya detik.
tL = waktu negatif atau waktu rendah (*low time*) satuannya detik.
T = periode sinyal satuannya detik.

Contoh: Suatu sinyal mempunyai periode 10 mdetik dan waktu positif sama dengan 3 mdetik. Berapakah waktu negatif atau waktu rendahnya dan *duty cycle*-nya.

Penyelesaian: $t_L = T - t_{Hw}$

$$t_L = 10 - 3 = 7\ mdetik$$

$$DC = \frac{t_H}{T} \times 100\% = \frac{3}{10} \times 100\% = 30\%$$

COPY

1.8 Karakteristik *Input-Output*

Karakteristik *input-output* merupakan sifat atau hubungan antara tegangan *input* dengan tegangan *output* yang digambarkan dengan grafik dua dimensi di mana sumbu horizontal menyatakan tegangan *input* dan sumbu vertikalnya tegangan *output*.

1.9 Detektor Penyilang-Nol (*Zero Crossing Detector*)

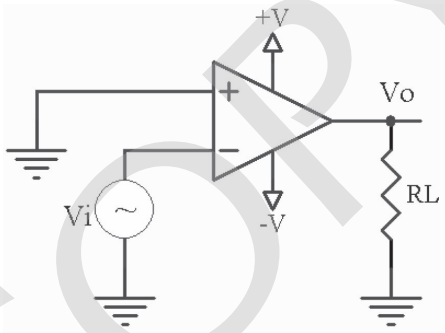
1.9.1 Detektor Penyilang-Nol Pembalik (*Inverting Zero Crossing Detector*/IZCD)

Sinyal masukan masuk pada (-) op amp dan membandingkan dengan nol pada (+) op amp.

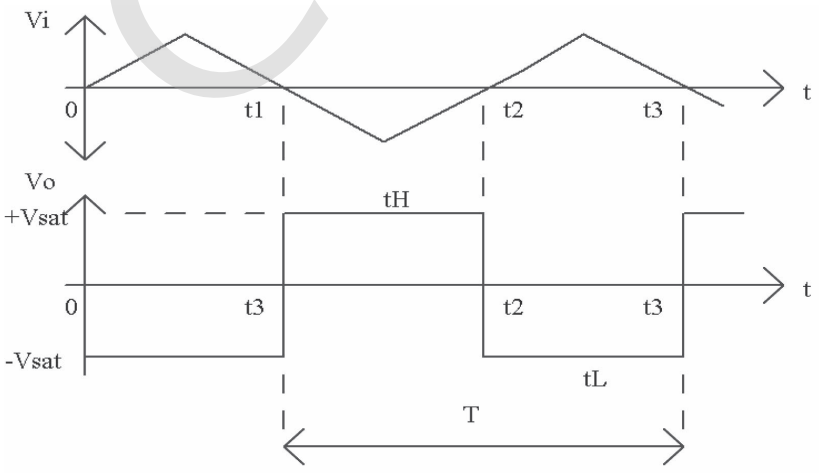
$Ed = (+)input - (-)input = 0 - Vi = -Vi$ (1.4)

$Vi < 0$..*maka*..$Vo = +Vsat$

$Vi > 0$..*maka*..$Vo = -Vsat$

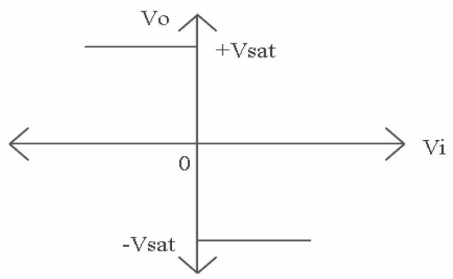


Gambar 1.7(a) *Rangkaian IZCD*



Gambar 1.7(b) *Hubungan sinyal input dan output*

COPY



Gambar 1.7(c) *Karakteristik input-output dari IZCD*

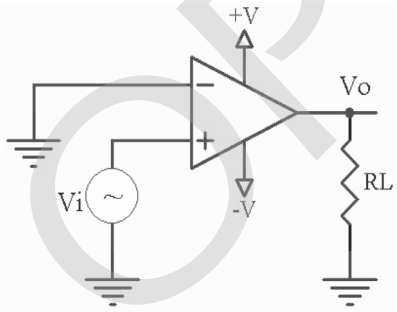
1.9.2 Detektor Penyilang-Nol Tak Membalik (*Non-Inverting Zero Crossing Detector*)

Sinyal masukan masuk pada (+) op amp dan membandingkan dengan nol pada (-) op amp.

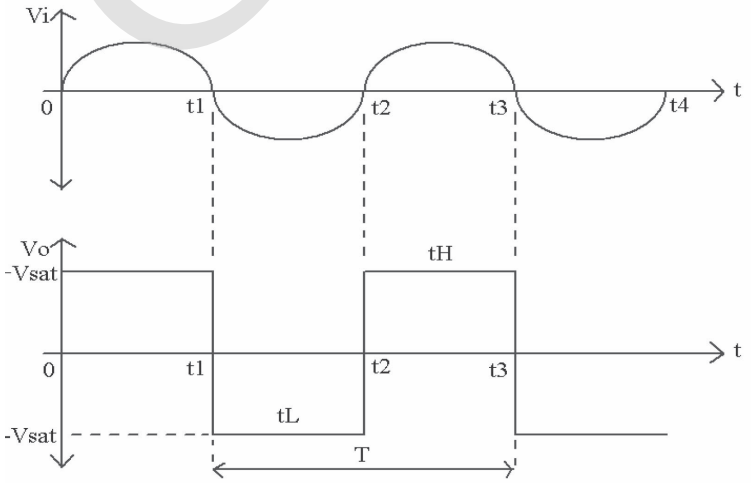
Ed = (+)input – (–)input = Vref – Vi (1.5)

Vi < Vref..maka..Vo = +Vsat

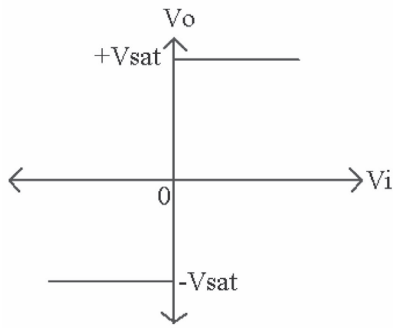
Vi > Vref..maka..Vo = –Vsat



Gambar 1.8(a) *Rangkaian NIZCD*



Gambar 1.8(b) *Hubungan sinyal input dan output*



Gambar 1.8(c) *Karakteristik input-output*

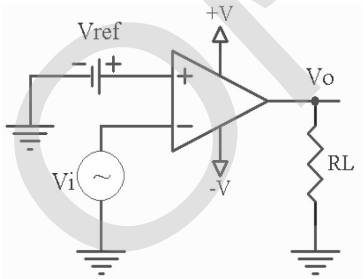
1.9.3 Detektor Taraf Tegangan Membalik (Inverting Voltage Level Detector /IVLD)

Sinyal masukan masuk pada (-) op amp dan membandingkan dengan tegangan pada (+) op amp.

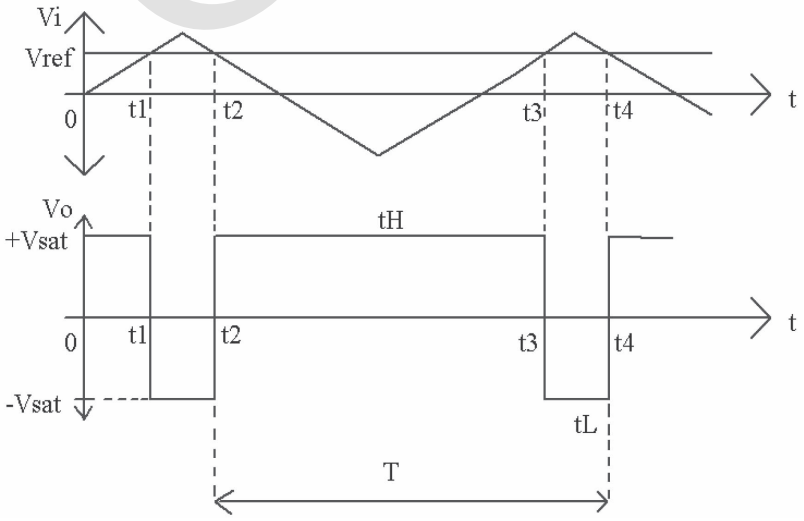
$Ed = (+)input - (-)input = Vi - Vref$ (1.6)

$Vi < Vref..maka..Vo = +Vsat$

$Vi > Vref..maka..Vo = -Vsat$

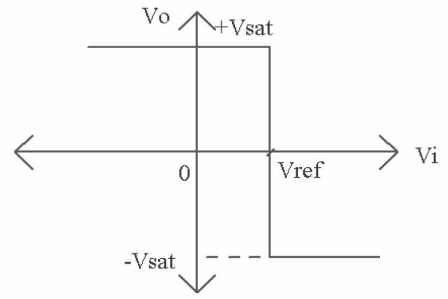


Gambar 1.9(a) *Rangkaian IVLD*



Gambar 1.9(b) *Hubungan sinyal input dan output*

COPY



Gambar 1.9(c) *Karakteristik input-output*

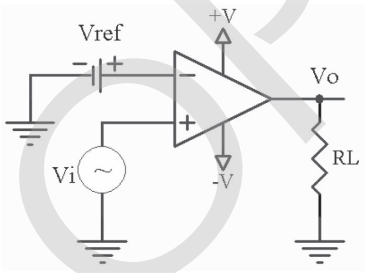
1.9.4 Detektor Taraf Tegangan Tak Membalik (*Non Inverting Voltage Level Detector*)

Sinyal masukan masuk pada (+) op amp dan membandingkan dengan tegangan pada (-) op amp.

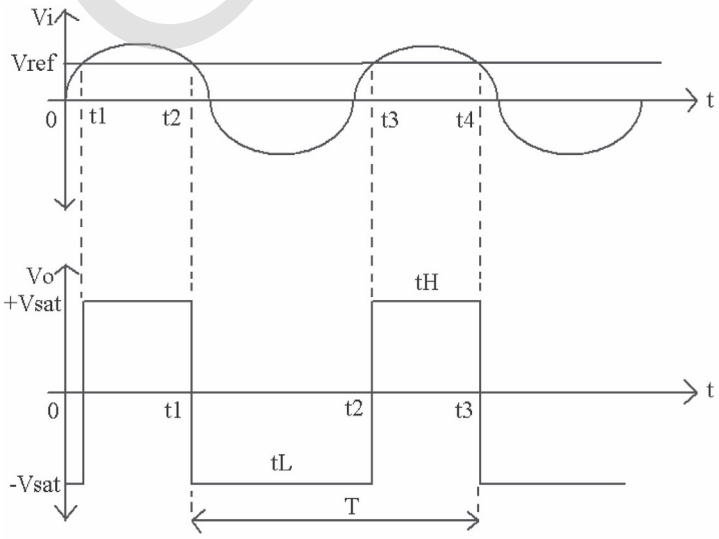
$Ed = (+)input - (-)input = Vi - Vref$ (1.7)

$Vi < Vref..maka..Vo = -Vsat$

$Vi > Vref..maka..Vo = +Vsat$

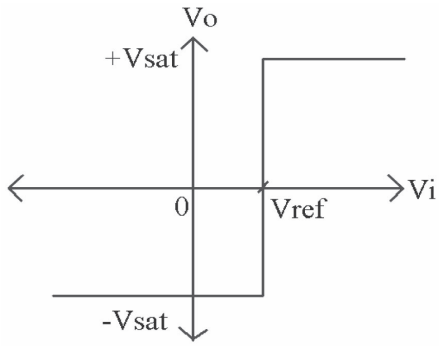


Gambar 1.10(a) *Rangkaian NIVLD*



Gambar 1.10(b) *Hubungan sinyal input dan output*

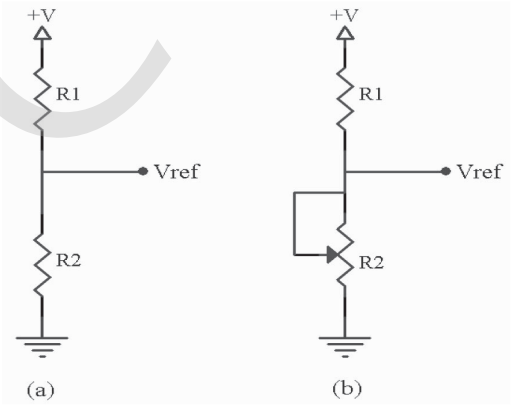
COPY



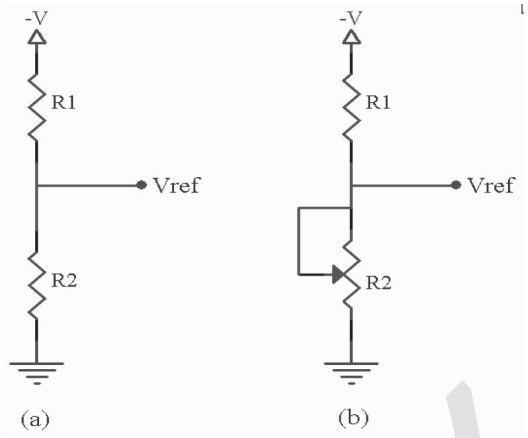
Gambar 1.10(c) *Karakteristik input-output*

1.10 Rangkaian Tegangan Referensi (Vref)

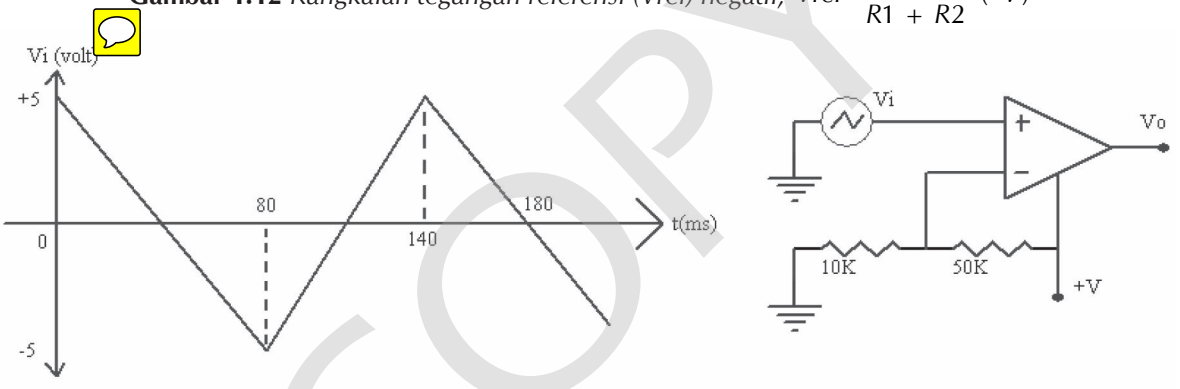
Rangkaian tegangan referensi adalah tegangan acuan yang digunakan sebagai pembanding. Jika rangkaian referensi sama dengan nol maka bisa langsung terhubung dengan ground. Apabila tegangan referensi suatu tegangan DC maka dengan menambah sumber tegangan DC lagi. Untuk menghemat dan membuat praktis rangkaian maka tegangan referensi atau Vref dapat dibuat dengan rangkaian pembagi tegangan yaitu disusun dengan dua buah resistor (untuk tegangan referensi yang tetap) atau satu buah resistor dan satu buah potensiometer (untuk tegangan referensi yang dapat diubah). Sumber tegangan dari rangkaian pembagi tegangan adalah sumber catu daya (*power supply*) untuk op amp, untuk tegangan referensi negatif dihubungkan dengan –V dan untuk tegangan referensi positif dihubungkan dengan +V.



Gambar 1.11 *Rangkaian tegangan referensi (Vref) positfp,*



Gambar 1.12 *Rangkaian tegangan referensi (Vref) negatif,* $Vref = \frac{R2}{R1 + R2} \cdot (-V)$



Penyelesaian:

$$Vref = \frac{10K}{10K + 50K} \cdot (+15V) = 2{,}5 \text{ volt}$$

Rangkaian *noninverting zero crossing detector* (NIZCD).

$Ed = non_iverting - inverting = Vi - Vref = Vi - 2{,}5$

Untuk waktu : $0 < t < 80$: $Vi(t) = \frac{-10}{80} t + 5$

$Vi(t) = -0{,}125t + 5$

Pada saat t = t1, vi(t) = 2,5 volt

Maka $2{,}5 = -0{,}125.t1 + 5$

$0{,}125.t1 = 5 - 2{,}5$

$t1 = \frac{2{,}5}{0{,}125} = 20\text{ms}$

COPY

Untuk waktu: $80 < t < 140$: $Vi(t) = \frac{10}{60}t + c$

Pada saat t = 80, Vi(t) = −5 volt

Maka: $-5 = \frac{1}{6}.(80) + c$

$C = -5 - 13\frac{1}{3} = -18\frac{1}{3}$

Dan $Vi(t) = \frac{1}{6}t - 18\frac{1}{3}$

Pada saat t = t2, Vi(t) = 2,5 volt

Maka: $2,5 = \frac{1}{6}.t2 - 18\frac{1}{3}$

$\frac{1}{6}.t2 = 2,5 + 18\frac{1}{3}$

t2 = 15 + 110 = 125 ms

Untuk waktu : $140 < t < 180$: $Vi(t) = -0,125.t + c$

Pada t = 140, Vi(t) = 5 volt.

Maka: $5 = -0,125.(140) + c$

C = 22,5

Dan Vi(t) = –0,125.t + 22,5

Pada saat t = t3, Vi(t) = 2,5 volt.

Maka: 2,5 = –0,125.t3 + 22,5

0,125.t3 = 22,5 – 2,5

t3 = 160 ms

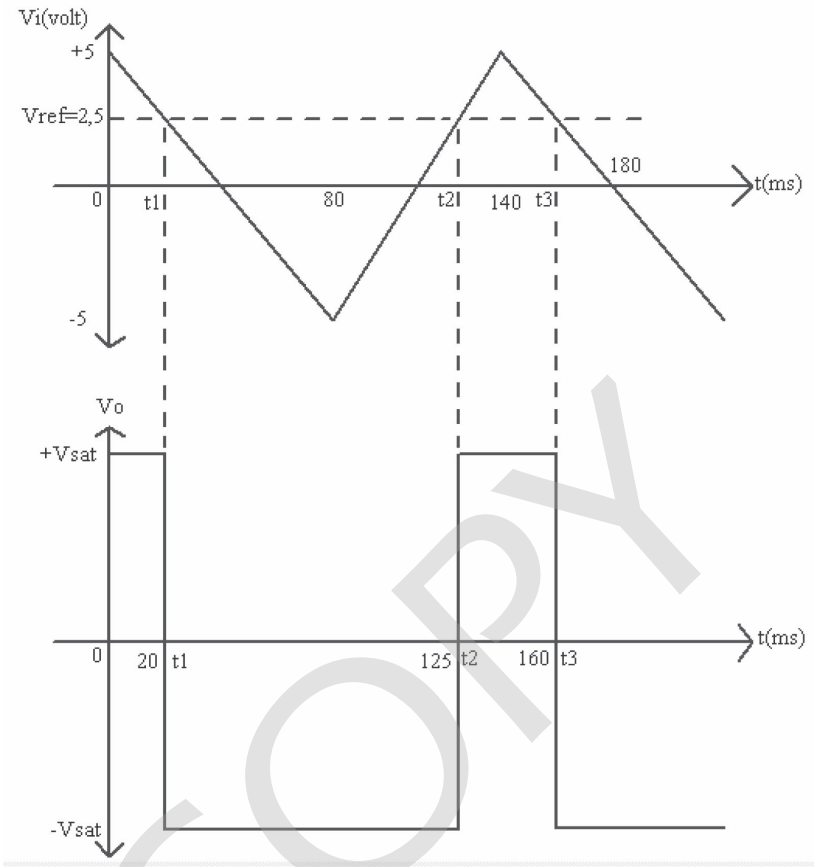
Maka tH = t3 – t2 = 160 - 125 = 35 ms

tL = t2 – t1 = 125 – 20 = 105 ms

T = tH + tL = 35 + 105 = 140 ms

$Dutycycle(DC) = \frac{tH}{T} \times 100\% = \frac{35}{140} \times 100\% = 25\%$

COPY

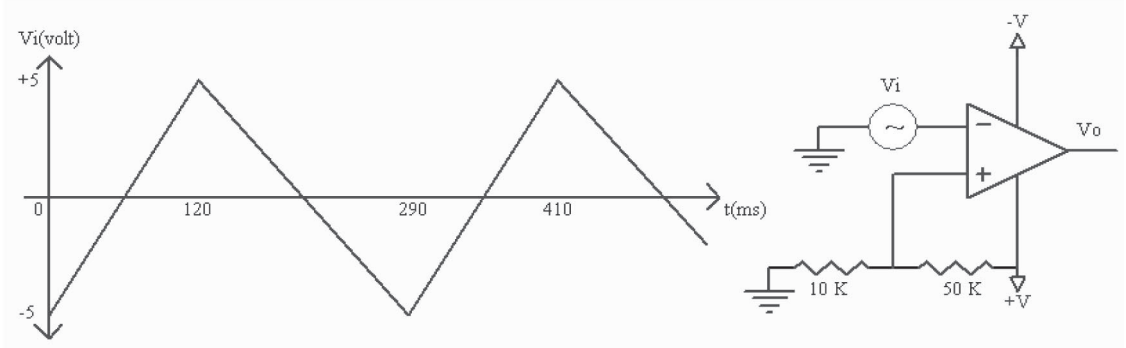


Contoh 1.2

Diketahui: ± V = ± 15 volt; ± Vsat = ± 13 volt

a. Gambarkan tegangan *output* Vo!

b. Hitunglah tL, Th, dan *duty cycle*!



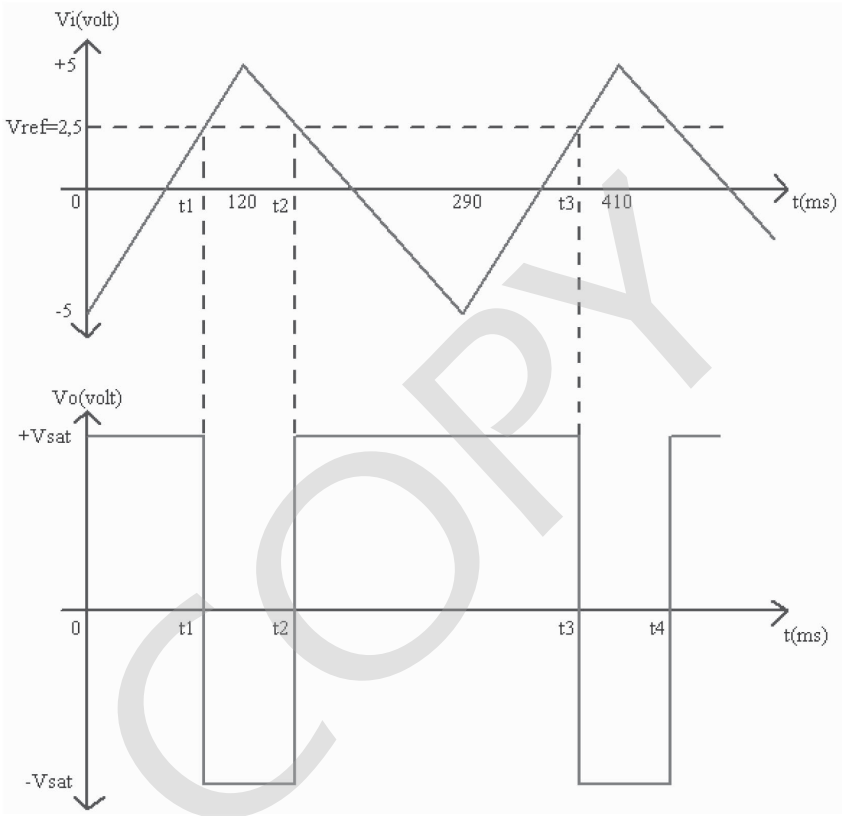
COPY

Penyelesaian:

$$Vref = \frac{10K}{10K + 50K} \cdot (+15V) = 2{,}5 \text{ volt}$$

Rangkaian *inverting zero crossing detector* (IZCD).

E_d = *non_iverting – inverting* = *Vref – Vi* = 2,5 – Vi



Untuk waktu: 0 < t < 120: $Vi(t) = \frac{10}{120}t - 5$

Pada saat t = t1, Vi(t) = 2,5 volt

Maka $2{,}5 = \frac{10}{120}t1 - 5$

$\frac{1}{12}t1 = 2{,}5 + 5$

$t1 = 90$ ms

Untuk waktu: 120 < t < 290: $Vi(t) = -\frac{10}{170}t + c$

Pada t = 120, Vi(t) = 5 volt.

COPY

Maka: $5 = -\frac{1}{17}\cdot(120) + c$

$C = 5 + \frac{120}{17} = 12\frac{1}{17}$

Dan $Vi(t) = -\frac{1}{17}t + 12\frac{1}{17}$

Pada saat t = t2, Vi(t) = 2,5 volt

Maka: $2,5 = -\frac{1}{17}.t2 + 12\frac{1}{17}$

$\frac{1}{17}.t2 = -2,5 + 12\frac{1}{17}$

$t2 = -42,5 + 205 = 162,5$ ms

Untuk waktu: $290 < t < 410$: $Vi(t) = \frac{1}{12}.t + c$

Pada saat t = 290, Vi(t) = −5 volt

Maka: $-5 = \frac{1}{12}.(290) + c$

$c = -5 - \frac{1}{12}.(290)$

$c = -5 - 24\frac{2}{12} = -29\frac{2}{12}$

Dan $Vi(t) = \frac{1}{12}.t - 29\frac{2}{12}$

Pada saat t = t3, Vi(t) = 2,5 volt

Maka: $2,5 = \frac{1}{12}t3 - 29\frac{2}{12}$

$\frac{1}{12}.t3 = 2,5 + 29\frac{2}{12}$

$t3 = 30 + 350 = 380$ ms

Maka $tH = t2 - t1 = 162,5 - 90 = 72,5$ ms

$tL = t3 - t2 = 380 - 162,5 = 217,5$ ms

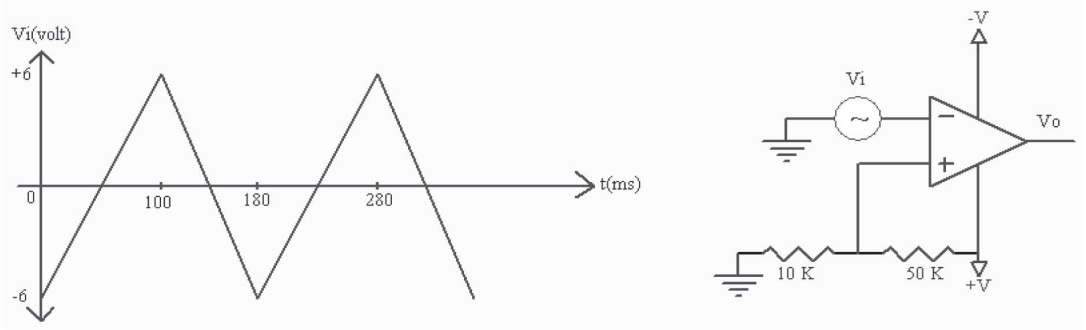
$T = tH + tL = 72,5 + 217,5 = 290$ ms

$Dutycycle\ (DC) = \frac{tH}{T}\times 100\% = \frac{72,5}{290}\times 100\% = 25\%$

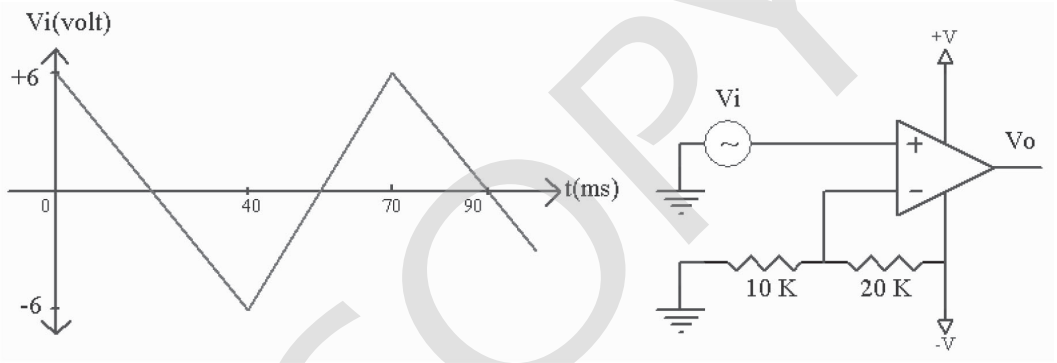
Latihan Soal

1) Diketahui sebuah op amp dengan data: ± V = ± 12 volt ; ± Vsat = ± 10 volt
   a. Hitunglah tL, tH, dan *duty cycle*!
   b. Gambarkan tegangan *output* Vo!

COPY



2) Diket: ± V = ± 15 volt ; ± Vsat = ± 13 volt
   a. Hitunglah tL, tH, dan *duty cycle*!
   b. Gambarkan tegangan *output* Vo!



COPY

COPY

BAB 2

Rangkaian Penguat (*Amplifier*)

COPY

2.1 Pendahuluan

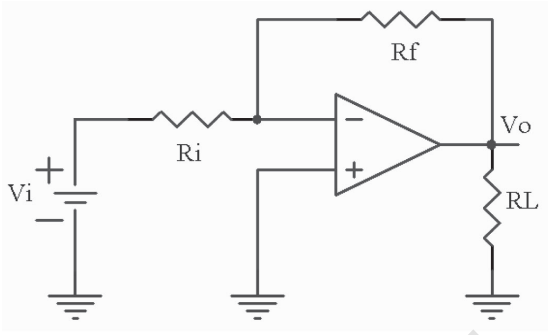
Salah satu penggunaan yang terpenting dari op amp adalah sebagai penguat (*amplifier*). Penguat (*amplifier*) adalah rangkaian yang menerima sinyal pada masukan (*input*) dan menghasilkan sinyal pada keluaran (*output*) yang tidak berubah, tetapi lebih besar amplitudonya. Ciri dari penguat adalah adanya rangkaian umpan balik negatif (*negative feed back*) yaitu adanya tahanan (*resistor*) luar yang dipasang sebagai penghubung antara terminal keluaran (*output*) dengan terminal masukan negatif (*negative input*). Dengan penambahan umpan balik negatif maka rangkaian tidak lagi tergantung pada penguatan untaian terbuka (*open loop gain AoL*). Rangkaian yang dihasilkan mempunyai penguatan untaian tertutup (*close loop gain AcL*) yang terbebas dari AoL. Penguatan (*gain*) untaian tertutup AcL tergantung pada tahanan luar saja.

2.2 Rangkaian Penguat Pembalik (*Inverting Amplifier*)

Rangkaian pada Gambar 2.1 adalah rangkaian dari op amp yang sangat berguna. Rangkaian ini merupakan sebuah penguat yang penguatan untaian tertutup dari Vi ke Vo ditentukan oleh nilai Rf dan Ri, yang dapat memperkuat sinyal ac atau sinyal dc. Untuk memahaminya maka op amp dibuat menjadi idealnya.

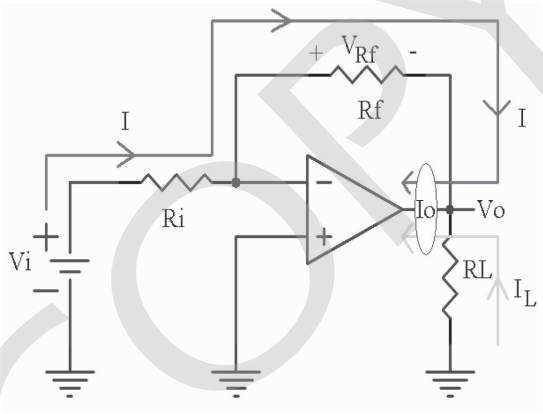
1. Tegangan Ed antara masukan (+) dan masukan (-) adalah sama dengan nol.
2. Arus yang masuk terminal masukan (+) dan masukan (-) dapat diabaikan atau sama dengan nol.

2.2.1 Tegangan Positif yang Masuk Pada Masukan Pembalik (*Inverting Input*)



Gambar 2.1 *Rangkaian inverting amplifier dengan input positif*

2.2.2 Arus Beban dan Arus Output



Gambar 2.2 *Aliran arus pada penguat pembalik dengan masukan positif*

Pada Gambar 2.2, tegangan *input* Vi terhubung dengan tahanan Ri masuk ke terminal masukan (-) dari op amp. Umpan balik dibuat oleh tahanan Rf yang menghubungkan terminal keluaran dengan terminal masukan (-). Op amp dianggap ideal sehingga tegangan antara masukan (+) dan masukan (-) sama dengan nol. Karena masukan (+) dihubungkan dengan ground maka terminal masukan (-) seolah-olah juga dihubungkan dengan ground yang disebut ground semu (*virtual ground*). Karena ujung satu terhubung dengan Vi dan ujung lainnya terhubung dengan ground maka akan mengalir arus I dari arah kiri ke kanan dan sesuai hukum Ohm besarnya I adalah:

$$I = \frac{Vi}{Ri} \qquad (2.1)$$

Karena arus yang masuk ke terminal masukan op amp sama dengan nol maka arus I akan mengalir semuanya melewati Rf dan timbul tegangan pada Rf dengan polaritas (+) pada ujung kiri Rf dan polaritas (-) pada ujung kanan Rf sebesar V_{RF} yaitu

$$V_{RF} = I.RF = \frac{Vi}{Ri}.Rf \qquad (2.2)$$

Karena polaritas (-) dari Rf tersambung dengan terminal keluaran (Vo) maka besarnya $Vo = -V_{Rf}$.

$$Vo = -V_{Rf} = -\frac{Vi}{Ri}.Rf = -\frac{Rf}{Ri}.Vi \qquad (2.3)$$

Dengan menggunakan gain untaian tertutup (AcL) maka besarnya adalah

$$A_{CL} = \frac{Vo}{Vi} = -\frac{Rf}{Ri} \qquad (2.4)$$

Tanda negatif pada persamaan di atas artinya adalah bahwa polaritas tegangan *output* (*Vo*) *terbalik* dengan polaritas tegangan input (*Vi*) makanya dinamakan *penguat pembalik* (*inverting amplifier*). Arus beban I_L yang mengalir melalui RL hanya ditentukan oleh RL dan Vo dan dikeluarkan dari terminal keluaran op amp adalah $I_L = \frac{Vo}{RL}$. Arus IL arahnya dari bawah ke atas karena tegangan output polaritasnya negatif. Arus keluaran (*output*) arahnya masuk ke terminal *output* dari op amp adalah $Io = I + I_L$. (2.5)

Contoh 2.1

Pada Gambar 2.2 diketahui Rf = 100 K, Ri = 10 K, Ei = 1 volt, dan RL = 25 K. Hitunglah I, Vo, AcL, I_L, Io!
Penyelesaian:

$I = \frac{Vi}{Ri} = \frac{1V}{10K} = 0{,}1mA$ (arahnya masuk ke terminal *output* op amp)

$Vo = -\frac{Rf}{Ri}.Vi = -\frac{100K}{10K}.(1V) = -10$ volt

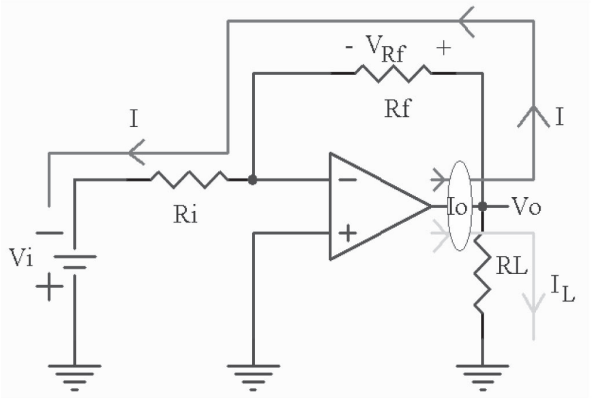
$A_{CL} = -\frac{Rf}{Ri} = -\frac{100K}{10K} = -10$ bisa juga dengan $A_{CL} = \frac{Vo}{Vi} = \frac{-10V}{1V} = -10$

$I_L = \frac{Vo}{RL} = -\frac{10K}{25K} = 0{,}4mA$ (mengalir melalui RL dari bawah ke atas)

$Io = I + IL = 0{,}1 + 0{,}4 = 0{,}5$ mA

Impedansi *input* yang dihadapi Vi adalah Ri.

2.2.3 Tegangan Negatif yang Masuk Pada Masukan Pembalik (*Inverting Input*)



Gambar 2.3 *Aliran arus pada penguat pembalik dengan masukan negatif*

COPY

Gambar 2.3 menunjukkan tegangan *input* negatif Vi melalui tahanan *input* Ri masuk ke terminal masukan (-) op amp. Semua prinsip dan persamaan dengan tegangan *input* positif tetap berlaku dan perbedaannya ada pada semua arah arus. Dengan membalik polaritas tegangan masukan Vi maka akan membalik arah arus dan polaritas tegangan dan keluaran tegangan *output* (Vo) positif. Arah arus I mengalir lewat Rf dari kanan ke kiri kemudian melewati Ri. Arus IL mengalir lewat RL dari atas menuju ke bawah.

Contoh 2.2

Pada Gambar 2.3. diketahui Rf = 250 K, Ri = 10 K, Ei = 0,5 volt dan RL = 25 K. Hitunglah I, Vo, AcL, I_L, Io!

Penyelesaian:

$I = \frac{Vi}{Ri} = \frac{0{,}5V}{10K} = 0{,}05mA$ (arahnya keluar ke terminal *output* op amp)

$Vo = -\frac{Rf}{Ri}.Vi = -\frac{250K}{10K}.(-0{,}5V) = 12{,}5$ volt

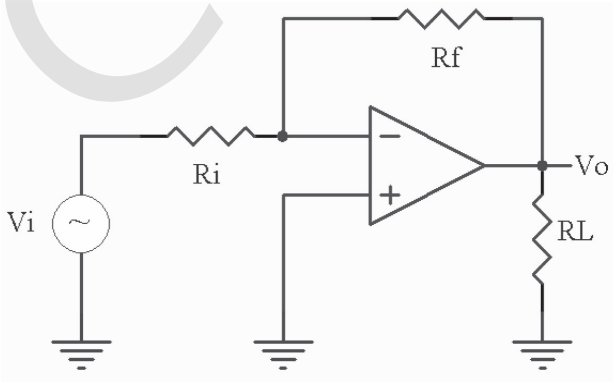
$A_{CL} = -\frac{Rf}{Ri} = -\frac{250K}{10K} = -25$ bisa juga dengan $A_{CL} = \frac{Vo}{Vi} = \frac{12{,}5V}{-0{,}5V} = -25$

$I_L = \frac{Vo}{RL} = \frac{12{,}5K}{25K} = 0{,}5mA$ (mengalir melalui RL dari bawah ke atas)

$Io = I + IL = 0{,}05 + 0{,}5 = 0{,}55$ mA

Impedansi *input* yang dihadapi Vi adalah Ri.

2.2.4 Tegangan AC yang Masuk Pada Masukan Pembalik (*Inverting Input*)



Gambar 2.4 *Rangkaian penguat pembalik dengan masukan sinyal ac*

Pada Gambar 2.4, tegangan sinyal input ac Vi melalui tahanan Ri masuk ke terminal masukan (-) op- amp. Apabila tegangan *input*-nya positif maka tegangan *output*-nya negatif dan apabila tegangan *input*-nya negatif maka tegangan *output*-nya menjadi positif. Persamaan pada tegangan *input* dc juga berlaku pada tegangan *input* ac. Frekuensi tegangan *output* sama dengan frekuensi tegangan *input*.

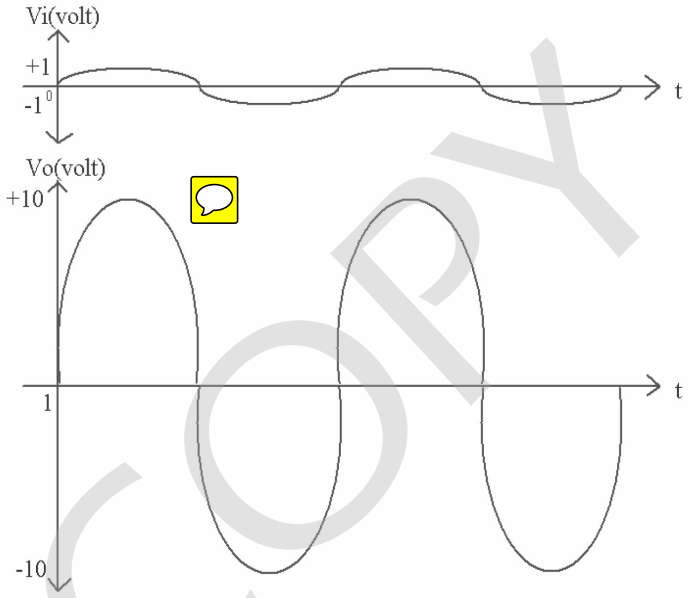
COPY

Contoh 2.3

Pada Gambar 2.4, Ri = 50KΩ, Rf = 500KΩ, RL = 10KΩ, Vi seperti gambar. Hitunglah A_{CL} dan gambarkan Vo!

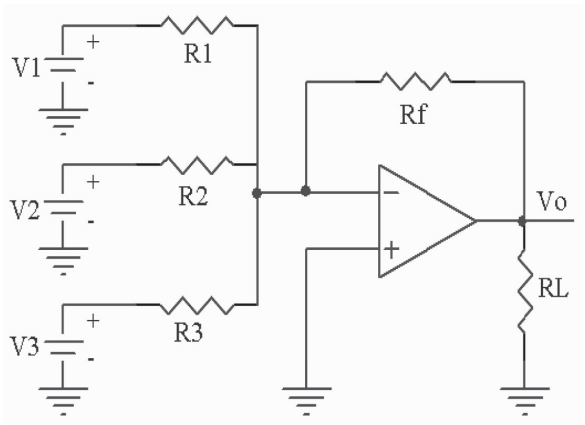
Penyelesaian: $A_{CL} = -\frac{Rf}{Ri} = -\frac{500K}{50K} = -10$

Apabila Vi = +1 V maka Vo = -10 V
Apabila Vi = -1 V maka Vo = + 10 V



2.2.5 Rangkaian Penjumlah Pembalik (*Inverting Adder*)

a. Penjumlah Pembalik



Gambar 2.5 *Rangkaian penguat pembalik sebagai penjumlah pembalik*

COPY

Dengan prinsip superposisi yaitu pada masukan negatif Op-amp ada 3 masukan tegangan (V1,V2,V3) dan rangkaian dari Op-amp adalah penguat pembalik maka nilai tegangan *output*-nya adalah

$$Vo = (-\frac{Rf}{R1}.V1) + (-\frac{Rf}{R2}.V2) + (-\frac{Rf}{R3}.V3) = -\left(\frac{V1}{R1}+\frac{V1}{R1}+\frac{V1}{R1}\right).Rf \quad (2.6)$$

Jika R1 = R2 = R3 = Rf maka

$Vo = -(V1 + V2 + V3)$

Contoh 2.4

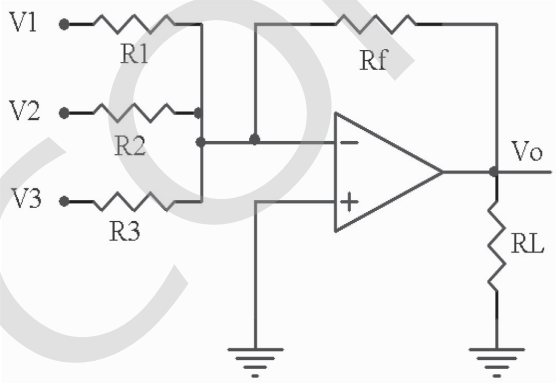
Pada Gambar 2.5 diketahui bahwa R1 = R2 = R3 = Rf = 10 K dan V1 = 2 V, V2 = 3 V, V3 = 1 V. Hitunglah besarnya Vo!

Penyelesaian:

Karena R1 = R2 = R3 = Rf maka $Vo = -(2 + 3 + 1) = -6V$.

Jika tegangan masukan yang ketiga polaritasnya dibalik maka Vo = −(2 + 3 + 1) = −6*V*.

b. Pembaur Audio

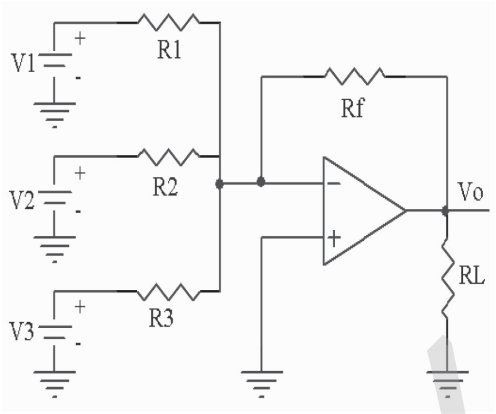


Gambar 2.6 *Rangkaian penguat pembalik sebagai rangkaian pembaur audio*

Pembaur audio adalah rangkaian Op-amp sebagai penjumlah dengan mengganti tegangan *input* V1, V2, V3, diganti dengan microphone. Misalkan V1 adalah microphone untuk gitar bass, V2 adalah microphone gitar melodi, V3 adalah microphone penyanyi.

COPY

c. Penjumlah Pembalik dengan Gain



Gambar 2.7 *Rangkaian penguat pembalik dengan penguatan (gain)*

Apabila nilai R1 ≠ R2 ≠ R3 ≠ Rf maka akan terjadi penguatan (*gain*) sehingga menjadi penjumlah pembalik dengan penguatan (*gain*). Dan tegangan *output* dari penjumlah pembalik menjadi:

$$Vo = (-\frac{Rf}{R1}.V1) + (-\frac{Rf}{R2}.V2) + (-\frac{Rf}{R3}.V3) \quad (2.7)$$

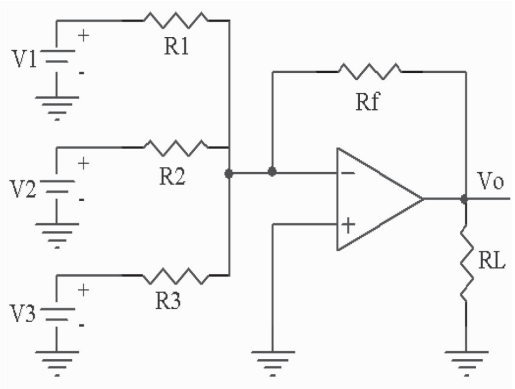
Contoh 2.5

Pada Gambar 2.7 diketahui bahwa R1 = 10 K, R2 = 20 K, R3 = 50 K, Rf = 100 K dan V1 = 1 V, V2 = 0,5 V, V3 = -1 V. Hitunglah besarnya Vo.

Penyelesaian:

$$Vo = (-\frac{Rf}{R1}.V1) + (-\frac{Rf}{R2}.V2) + (-\frac{Rf}{R3}.V3) = \left(-\frac{100}{10}.1\right) + \left(-\frac{100}{20}.0{,}5\right) + \left(-\frac{100}{50}.(-1)\right) = -10{,}5\text{V}$$

d. Penguat perata-rata pembalik



Gambar 2.8 *Rangkaian penguat perata-rata pembalik*

COPY

Apabila jumlah masukan suatu penguat pembalik adalah n-masukan dan nilai $Rf = \frac{R}{n}$ dengan nilai R1 = R2 = R3 = R maka tegangan output dari penguat pembalik adalah

$$Vo = \left(\frac{V1 + V2 + V3}{\text{n}} \right) \qquad (2.8)$$

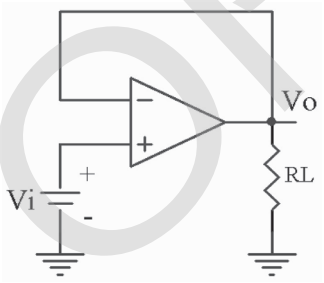
Contoh 2.6

Pada gambar 2.8 diketahui bahwa R1 = R2 = R3 = R = 100 K, $Rf = \frac{100}{3} = 33K$ dan V1 = 5 V, V2 = 8 V, V3 = -1 V. Hitunglah besarnya Vo!

Penyelesaian:

$$Vo = -\left(\frac{V1 + V2 + V3}{n} \right) = -\left(\frac{5 + 8 + (-1)}{n} \right) = -4V$$

2.3 Pengikut Tegangan (*Voltage Follower*)



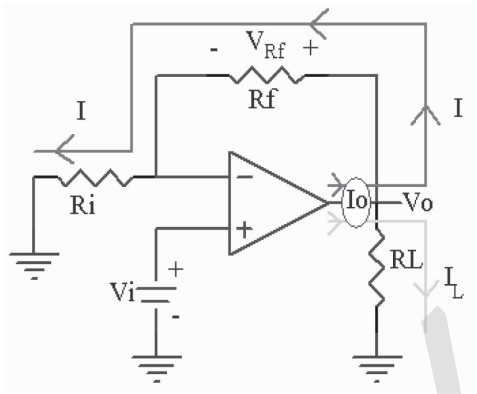
Gambar 2.9 *Rangkaian penguat dengan penguatan satu atau pengikut tegangan*

Sebuah penguat yang mempunyai penguatan (*gain*) sama dengan satu dinamakan rangkaian pengikut tegangan (*voltage follower*) yaitu besarnya tegangan *output* (Vo) tergantung besarnya tegangan *input* (Vi) atau sebagai penyangga (*buffer*) karena dari rangkaian ini didapatkan impedansi *input* yang besar.

$$Vo = Vi \qquad (2.9)$$

COPY

2.4 Rangkaian Penguat Tak Membalik (*Non inverting Amplifier*)



Gambar 2.10 *Rangkaian penguat tak membalik*

Pada Gambar 2.10, tegangan input Vi masuk ke terminal masukan (+) dari op amp. Umpan balik dibuat oleh tahanan Rf yang menghubungkan terminal keluaran dengan terminal masukan (-). Op amp dianggap ideal sehingga tegangan antara masukan (+) dan masukan (-) sama dengan nol. Karena masukan (+) dihubungkan dengan Vi maka terminal masukan (-) seolah-olah juga dihubungkan dengan Vi. Tahanan Ri terhubung dengan masukan (-) Op-amp atau Vi dan ujung lainnya terhubung dengan ground maka akan mengalir arus I dari arah kanan ke kiri dan sesuai hukum Ohm besarnya I adalah:

$$I = \frac{Vi}{Ri} \tag{2.10}$$

Karena arus yang masuk ke terminal masukan op amp sama dengan nol maka arus I berasal dari Vo dan semuanya melewati Rf dari kanan ke kiri sehingga timbul tegangan pada Rf dengan polaritas (+) pada ujung kanan Rf dan polaritas (-) pada ujung kiri Rf sebesar V_{Rf} yaitu

$$V_{Rf} = I.Rf = \frac{Vi}{Ri}.Rf \tag{2.11}$$

Karena polaritas (+) dari tegangan Rf tersambung dengan terminal keluaran (Vo) maka besarnya Vo merupakan penjumlahan anatara tegangan Rf dengan tegangan *input* Vi sehingga $Vo = V_{Rf} + Vi$.

$$Vo = V_{Rf} + Vi = \frac{Vi}{Ri}.Rf + Vi = \frac{Rf}{Ri}.Vi + Vi = \left(\frac{Rf}{Ri} + 1\right)Vi \tag{2.12}$$

Dengan menggunakan gain untaian tertutup (AcL) maka besarnya adalah

$$A_{CL} = \frac{Vo}{Vi} = \left(\frac{Rf}{Ri} + 1\right) \tag{2.13}$$

Tidak adanya tanda negatif pada persamaan di atas artinya adalah bahwa polaritas tegangan *output* (Vo) sama dengan polaritas tegangan *input* (Vi) makanya dinamakan *penguat tak membalik* (*non-inverting amplifier*). Arus beban yang mengalir melalui RL hanya ditentukan oleh RL dan Vo dan dikeluarkan dari terminal keluaran op amp adalah $I_L = \frac{Vo}{RL}$. Arus IL arahnya dari atas ke bawah karena tegangan *output* polaritasnya posi-

COPY

tif. Arus keluaran (*output*) arahnya keluar dari terminal *output* dari op amp terpisah menjadi dua yaitu I yang melewati Rf dan IL yang melewati RL sehingga $Io = I + I_L$.

Contoh 2.7

Pada Gambar 2.10 diketahui Rf = 50 K, Ri = 10 K, Vi = 1 volt, dan RL = 25 K. Hitunglah I, Vo, AcL, I_L, Io!

Penyelesaian:

$I = \frac{Vi}{Ri} = \frac{0{,}5V}{10K} = 0{,}5mA$ (arahnya keluar ke terminal *output* op amp)

$Vo = \left(\frac{Rf}{Ri}+1\right).Vi = \left(\frac{50}{10}+1\right).(1V) = 6$ volt

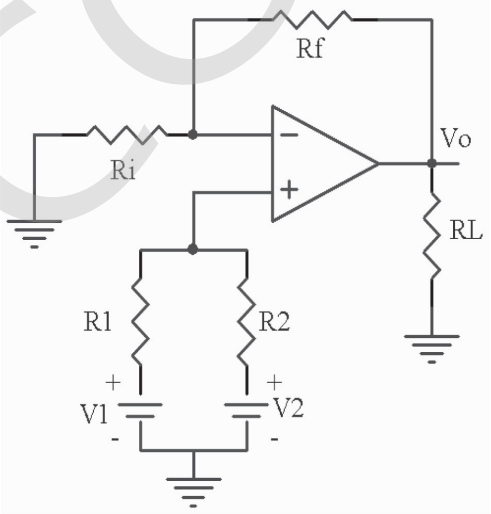
$A_{CL} = \left(\frac{Rf}{Ri}+1\right) = \left(\frac{50}{10}+1\right) = 6$ bisa juga dengan $A_{CL} = \frac{Vo}{Vi} = \frac{6V}{1V} = 6$

$I_L = \frac{Vo}{RL} = \frac{6V}{25K} = 0{,}24mA$ (mengalir melalui RL dari atas ke bawah)

$Io = I + IL = 0{,}1 + 0{,}24 = 0{,}34\ mA$

Impedansi *input* yang dihadapi Vi adalah Ri.

2.5 Rangkaian Penjumlah Tak Membalik (*Non Inverting Adder*) Dua Masukan



Gambar 2.11 *Rangkaian penjumlah tak membalik dua masukan*

Rangkaian penguat tak membalik bisa juga tegangan masukannya lebih dari satu (misalkan dua masukan yaitu V1 dan V2). Untuk mencari penguatan dan tegangan *output* Vo dari rangkaian ini maka dengan menggunakan prinsip teknik superposisi untuk mencari tegangan *input* yang masuk pada masukan (+) Op-amp

didapatkan $Vi = \left(\frac{R2}{R1+R2}\right).V1 + \left(\frac{R1}{R1+R2}\right).V2$ (2.14)

sehingga tegangan output Vo adalah

$$Vo = \left(\frac{Rf}{Ri}+1\right)\left(\frac{R2}{R1+R2}.V1 + \frac{R1}{R1+R2}.V2\right) \quad (2.15)$$

Sedangkan penguatannya (gain) adalah $A_{CL} = \frac{Vo}{Vi}$

Contoh 2.8

Pada Gambar 2.11 diketahui Rf = 50 K, Ri = 10 K, V1 = 1 volt, V2 = 2 volt, R1 = 10K, R2 = 15K, dan RL = 25 K. Hitunglah Vo, AcL!

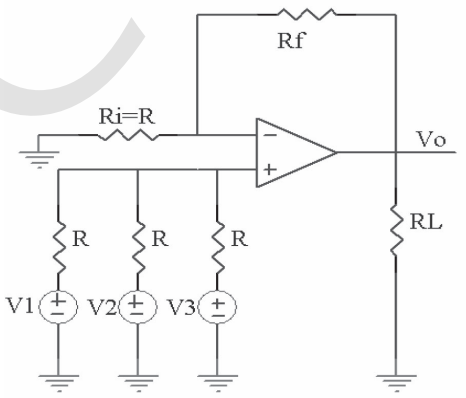
Penyelesaian:

$$Vi = \left(\frac{R2}{R1+R2}\right).V1 + \left(\frac{R1}{R1+R2}\right).V2 = \left(\frac{15}{10+15}\right)(1) + \left(\frac{10}{10+15}\right)(1) = 0{,}6 + 0{,}8 = 1{,}4V$$

$$Vo = \left(\frac{Rf}{Ri}+1\right).Vi = \left(\frac{50}{10}+1\right).(1{,}4V) = 8{,}4\ volt$$

$$A_{CL} = \frac{Vo}{Vi} = \frac{8{,}4V}{1{,}4V} = 6$$

2.6 Penjumlah Tak Membalik N-Masukan



Gambar 2.12 *Rangkaian penjumlah tak membalik N - masukan*

Apabila jumlah masukan dari penguat tak membalik lebih dari dua atau dinamakan N-masukan dengan nilai semua resistornya sama kecuali nilai resistor Rf. Jika nilai semua resistor sama dengan R dan nilai Rf sama dengan $Rf = (n-1).R$ maka besarnya tegangan *output* Vo adalah $Vo = V1 + V2 + V3$.

COPY

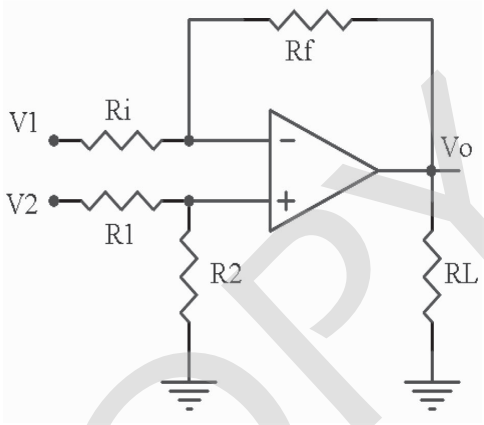
Contoh 2.9

Pada Gambar 2.12 diketahui R1 = R2 = R3 = R = 10 K, Ri = 10 K, Rf = (3-1).10 = 20 K, V1 = 1 volt, V2 = 2 volt, V3 = 3volt, dan RL = 25 K. Hitunglah Vo!

Penyelesaian:

Vo = 1 + 2 + 3 = 6 volt

2.7 Penguat Selisih (*Differential Amplifier*)



Gambar 2.13 *Rangkaian penguat selisih*

Rangkaian penguat selisih adalah rangkaian penguat yang terdiri dari penguat pembalik dan penguat tak membalik yang tegangan *output*-nya merupakan selisih (*differential*) dari tegangan *input*-nya. Karena tegangan *input*-nya ada dua yaitu V1 dan V2 maka dengan teknik superposisi didapatkan tegangan *output*-nya (Vo). Apabila V2 yang aktif dan V1 tidak aktif maka menjadi rangkaian penguat tak membalik dan apabila V1 yang aktif dan V2 yang tidak aktif maka menjadi rangkaian penguat membalik.

$$Vo = \left(\frac{Rf}{Ri}+1\right)\left(\frac{R1}{R1+R2}.V2\right) - \frac{Rf}{Ri}.V1 \qquad (2.16)$$

Jika nilai perbandingan resistor seimbang $\frac{Ri}{R1} = \frac{Rf}{R2}$ maka $Vo = \frac{Rf}{Ri}(V2 - V1)$ (2.17)

Contoh 2.10

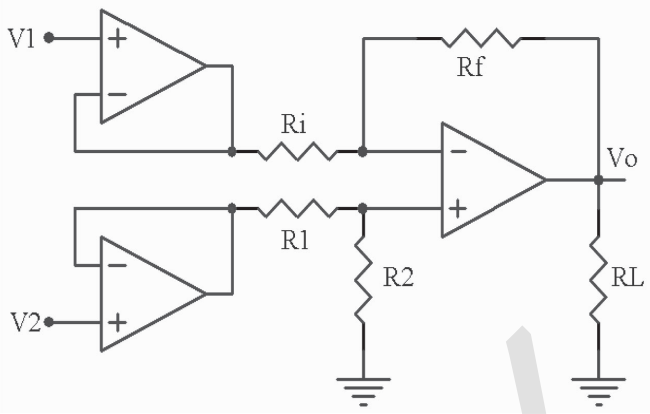
Pada Gambar 2.13 diketahui Rf = 50 K, Ri = 10 K, V1 = 1 volt, V2 = 2 volt, R1 = 10K, R2 = 15K, dan RL = 25 K. Hitunglah Vo, AcL!

Penyelesaian:

$$Vo = \left(\frac{Rf}{Ri}+1\right)\left(\frac{R1}{R1+R2}.V2\right) - \frac{Rf}{Ri}.V1 = \left(\frac{50}{10}+1\right)\left(\frac{15}{10+15}.2\right) - \frac{50}{10}.(1) = 7{,}2 - 5 = 2{,}5 \text{ V}$$

COPY

2.8 Penguat Instrumentasi (*Instrumentation Amplifier*)



Gambar 2.14 *Rangkaian penguat instrumentasi*

Penguat instrumentasi adalah suatu penguat yang sering digunakan pada peralatan ukur atau instrumen elektronik yang biasanya sinyal tegangan input sangat kecil (dalam mV atau mungkin uV). Penguat instrumentasi ini terdiri dari 3 buah Op-amp yaitu 2 buah Op-amp yang depan berfungsi sebagai penyangga (*buffer*) dan Op-amp yang belakang sebagai penguat selisih (*differential*). Op-amp yang berfungsi sebagai penyangga dimanfaatkan impedansi input-nya yang nilainya sangat besar, tetapi penguatannya hanya satu. Sedangkan Op-amp sebagai penguat selisih mempunyai penguatan (*gain*) yang besar. Tegangan *output* sama dengan tegangan *output* penguat selisih.

$Vo = \left(\frac{Rf}{Ri}+1\right)\left(\frac{R2}{R1+R2}.V2\right)-\frac{Rf}{Ri}.V1$. Tetapi, apabila terjadi keseimbangan pada $\frac{Ri}{R1}=\frac{Rf}{R2}$ maka tegangan *output*-nya menjadi sederhana $Vo = \frac{Rf}{Ri}(V2-V1)$ (2.18)

Contoh 2.11

Pada Gambar 2.14 diketahui Rf = 50 K, Ri = 10 K, R1 = 10 K, R2 = 50 K, V1 = 1 volt, V2 = 2 volt, dan RL = 25 K. Hitunglah Vo, AcL!

Penyelesaian:

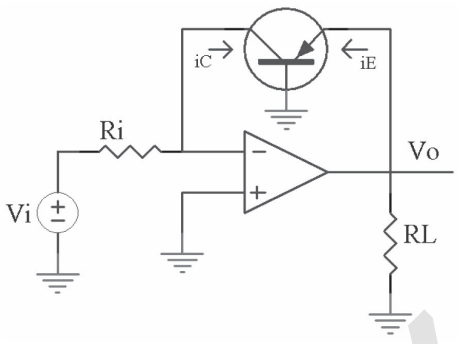
Karena Ri.R2 = R1.Rf mak

$$Vo = \frac{Rf}{Ri}(V2-V1) = \frac{50}{10}(2-1) = 5V$$

$$ACL = \frac{Vo}{(V2-V1)} = \frac{Rf}{Ri} = \frac{50K}{10K} = 5$$

COPY

2.9 Penguat Logaritma (*Logaritmic Amplifier*)



Gambar 2.15 *Rangkaian penguat logaritma*

Rangkaian penguat algoritma adalah penguat yang tegangan *output*-nya (Vo) merupakan logaritma dari tegangan *input* (Vi). Tahanan umpan balik (Rf) diganti dengan sebuah transistor *common base*. Menurut hukum Kirchoff, nilai $iC \approx -iE$ karena nilai iB kecil sekali. Dari karakteristik transistor

$$iC = C_{21}\left(e^{\frac{V_{EB}}{KT}} - 1\right) + C_{22}\left(e^{\frac{V_{CB}}{KT}} - 1\right) \qquad (2.19)$$

$V_{EB} = Vo$ dan V_{CB} [illegible]

C_{21} dan C_{22} = konstanta

$$iC = C\left(e^{\frac{V_o}{KT}} - 1\right)$$

Arus yang lewat Ri yang berasal dari sumber tegangan *input* Vi arahnya ke kanan sehingga sama dengan iC.

$$\frac{Vi}{Ri} = C_{21}\left(e^{\frac{V_o}{KT}} - 1\right)$$

Apabila nilai $e^{\frac{V_o}{KT}} >> 1$ mak[illegible] $= Ri.C_{21}\left(e^{\frac{V_o}{KT}} - 1\right)$

sehingga $Vo = K.T\ln\left(\frac{Vi}{Ri.C_{21}}\right)$ (2.20)

Di mana: Vi = Tegangan input (V)
Ri = resistansi input (ohm)
C_{21} = konstanta arus balik (A)
K = Konstanta Boltzman = 8,62 x 10^{-5} eV/^{0}K = 1,38 x 10^{-23} J/^{0}K
T = Temperatur mutlak (^{0}K)
Vo = Tegangan *output* (V)

COPY

Contoh 2.12

Pada Gambar 2.15 diketahui Ri = 10 K, RL = 25 K, Vi = 2 volt, pada suhu ruang T = 300K, K = $8{,}62.10^{-5}$ eV/^{0} K, . Hitunglah Vo!

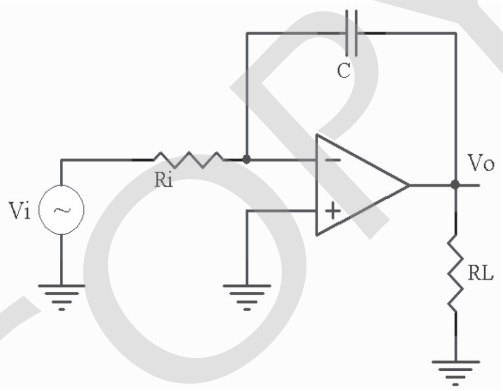
Penyelesaian:

$$K.T = 0{,}026V$$

$$Vo = K.T\ln\left(\frac{Vi}{Ri.C_{21}}\right)$$

$$Vo = 0{,}026.\ln\left(\frac{2}{10^4.10^{-9}}\right) = 0{,}026.\ln\left(2.10^4\right) = 0{,}32V$$

2.10 Rangkaian Integrator



Gambar 2.16 *Rangkaian Integrator*

Rangkaian integrator adalah rangkaian umpan balik negatif di mana komponen umpan baliknya adalah sebuah kapasitor. Tegangan *output* (Vo) dari rangkaian merupakan integral dari tegangan *input* (Vi). Menurut hukum Kirchoff maka nilai $I = iC$.

$$I = \frac{Vi}{Ri} \text{ dan } i_C = C.\frac{dVc}{dt} \qquad (2.21)$$

$$Vo = -Vc$$

$$\frac{Vi}{Ri} = C.\frac{d(-Vc)}{dt}$$

$$dVo = -\frac{1}{Ri.C}Vi.dt$$

Diintegralkan menjadi $\int dVo = -\frac{1}{Ri.C}\int Vidt$

sehingga $Vo = -\frac{1}{Ri.C}\int Vidt + K$ (2.22)

Di mana: Vi = Tegangan *input* (V)
Ri = resistansi *input* (ohm)
C = kapasitor (F)
K = konstanta atau kondisi awal tegangan kapasitor (V)
Vo = Tegangan *output* (V)

Contoh 2.13

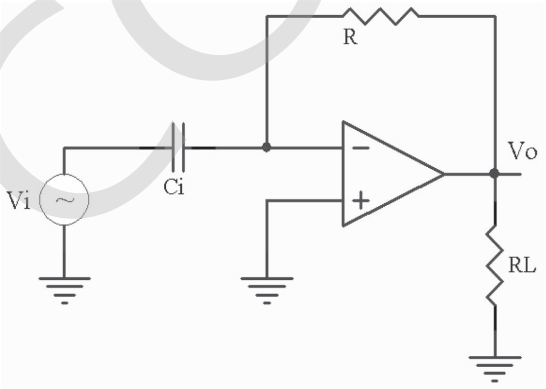
Pada Gambar 2.16 diketahui Ri = 10 K, C = 1 uF, RL = 25 K, Vi = 2 volt, hitunglah Vo jika pada kondisi awal kapasitor dalam keadaan kosong!

Penyelesaian:

$$Vo = -\frac{1}{Ri.C}\int Vidt$$

$$Vo = -\frac{1}{10^4.10^{-6}}\int 2dt = -100.(2t) + K = -200t \text{ volt}$$

2.11 Rangkaian Differentiator



Gambar 2.17 *Rangkaian Differentiator*

Rangkaian integrator adalah rangkaian umpan balik negatif di mana komponen umpan baliknya adalah sebuah kapasitor. Tegangan *output* (Vo) dari rangkaian merupakan integral dari tegangan *input* (Vi). Menurut hukum Kirchoff maka nilai *iC = I*.

$$I = \frac{0 - Vo}{R} = \frac{-Vo}{R} \text{ dan } i_c = Ci.\frac{dVi}{dt}$$

$$\frac{-Vo}{R} = Ci.\frac{dVi}{dt}$$

COPY

$$Vo = -R.Ci.\frac{dVi}{dt} \qquad (2.23)$$

Di mana: Vi = Tegangan input (V)
R = resistansi feed back (ohm)
Ci = kapasitor input (F)
Vo = Tegangan output (V)

Contoh 2.14

Pada Gambar 2.17 diketahui R = 100 K, Ci = 1 uF, RL = 25 K, Vi = 5.t volt, hitunglah Vo jika pada kondisi awal kapasitor dalam keadaan kosong!

Penyelesaian:

$$Vo = -R.Ci.\frac{dVi}{dt}$$

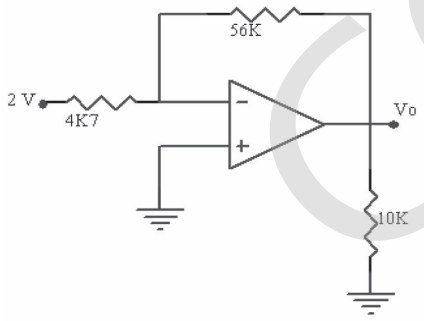
$$Vo = -10^{5}.10^{-6}.\frac{d(5t)}{dt} = -0{,}5 \text{ volt}$$

Latihan Soal

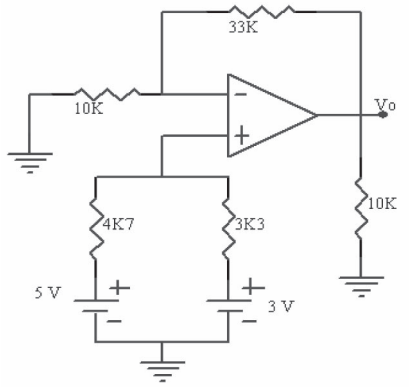
Diketahui bahwa op amp mempunyai + V = + 15 volt; + Vsat = + 14 volt.

Hitunglah tegangan output (Vo)!

1.

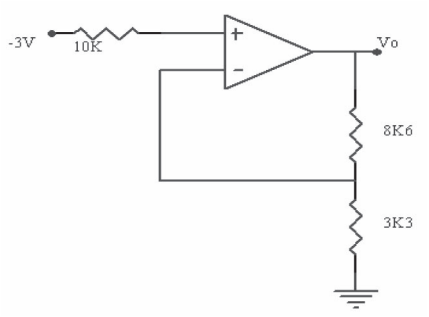


2.

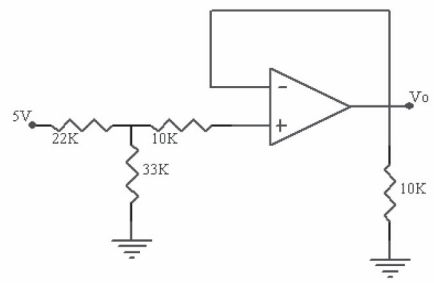


COPY

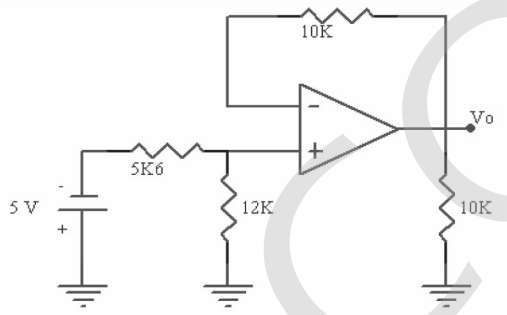
3.


-3V
10K
Vo
8K6
3K3

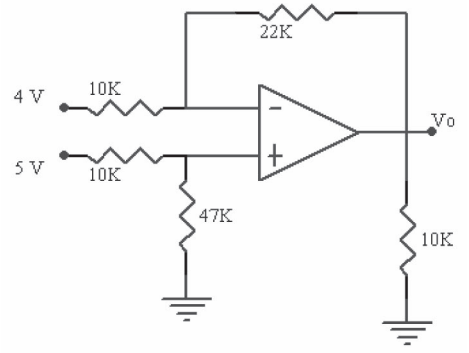
4.


5V
22K
10K
33K
Vo
10K

5.

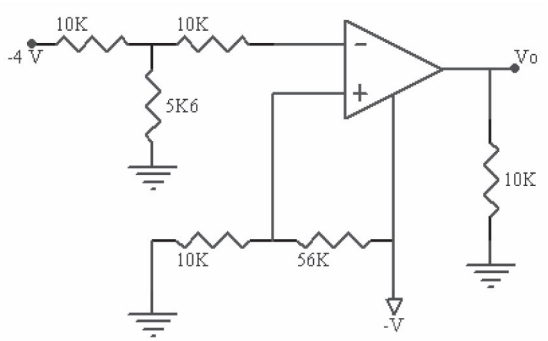

10K
Vo
5K6
5 V
12K
10K

6.

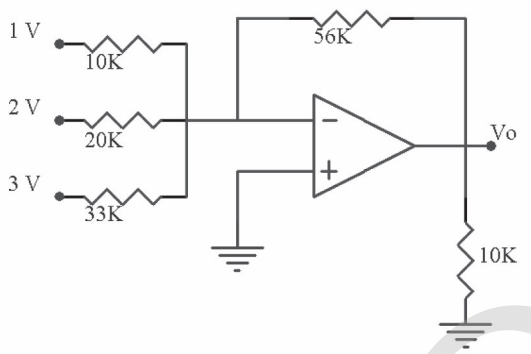

22K
4 V
10K
Vo
5 V
10K
47K
10K

COPY

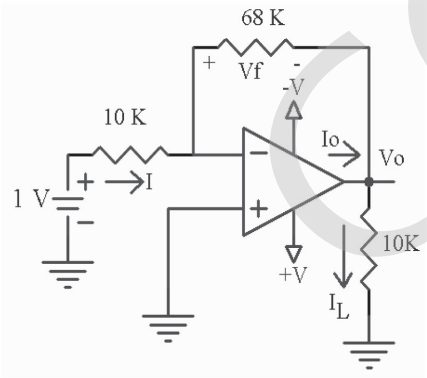
7.



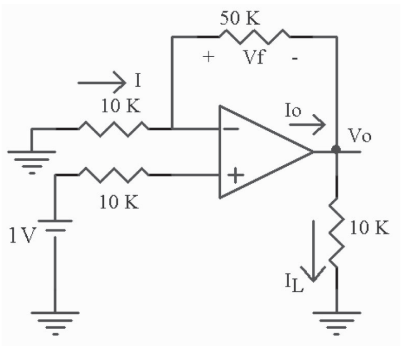
8.



9. Hitunglah I, Vo, AcL, , Io!

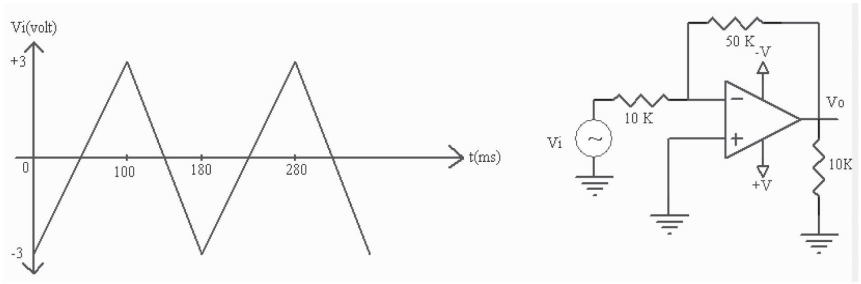


10. Hitunglah I, Vo, AcL, , Io!

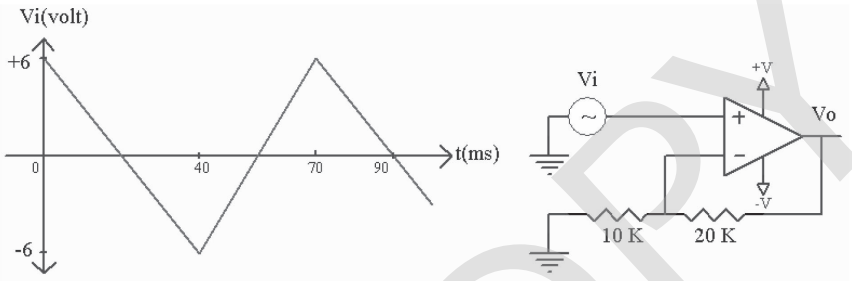


COPY

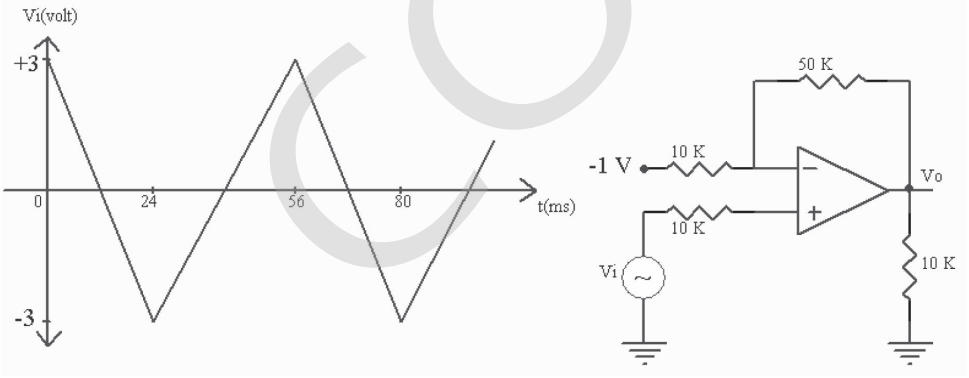
11. Gambarkan bentuk gelombang *output* (Vo)!



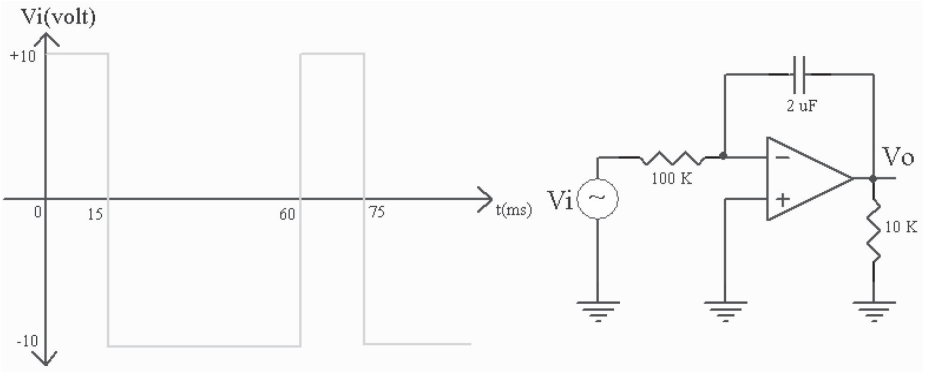
12. Gambarkan bentuk gelombang *output*-nya (Vo)!



13. Gambarkan bentuk gelombang *output*!

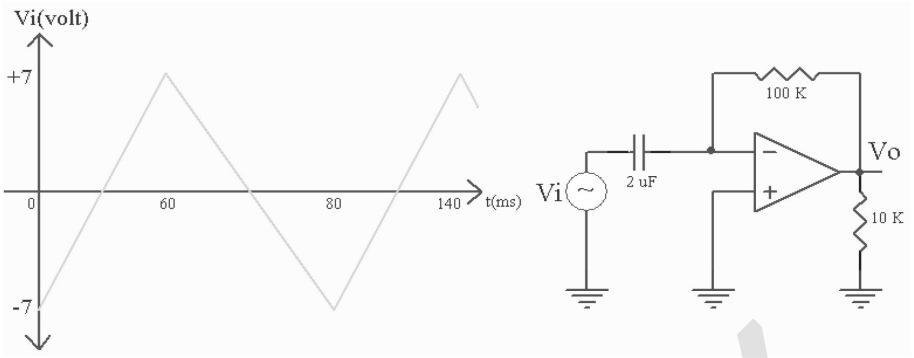


14. Gambarkan bentuk gelombang *output* (Vo)!



COPY

15. Gambarkan bentuk gelombang *output* (Vo)!



COPY

COPY

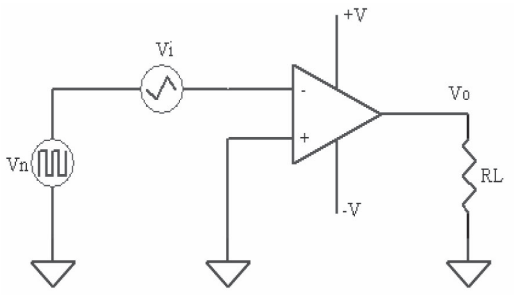
BAB 3

Rangkaian Pembanding (*Comparator*)

COPY

3.1 Pendahuluan

Sebuah pembanding (komparator) adalah rangkaian yang berfungsi membandingkan tegangan sinyal *input* dengan suatu tegangan referensi. Rangkaian komparator yang sudah diperkenalkan sebelumnya yaitu berupa rangkaian detektor yang bersifat *open loop* dan tegangan *input*-nya tidak mengalami noise (gangguan). Bagaimanakah jika sebuah *inverting zero crossing detector* sinyal *input*-nya terkena *noise* seperti Gambar 3.1.



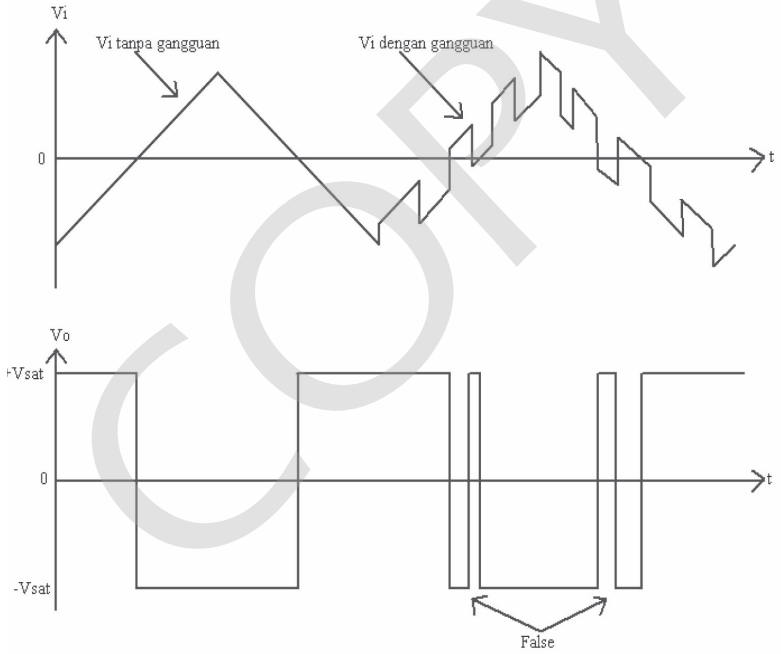
Gambar 3.1 *Rangkaian IZCD di mana tegangan input-nya mendapat noise*

Sesuai dengan sitat op amp sebagai detektor maupun komparator, tegangan *output* (Vo) didapatkan dengan adanya tegangan selisih masukan (Ed). Jika polaritas Ed adalah positif maka Vo sama dengan +Vsat, demikian juga sebaliknya. Pada

saat tegangan *input* (Vi) tanpa gangguan maka tegangan *output* (Vo) sesuai, tetapi apabila tegangan *input* (Vi) terkena gangguan *noise* yang disimbolkan dengan tegangan *noise* (En) maka tegangan yang masuk pada kaki *inverting input* menjadi (Vi + Vn) sehingga tegangan selisih masukan (Ed) menjadi

$$Ed = 0 - (Vi + Vn) = -(Vi + Vn) \quad (3.1)$$

Sedangkan gambar tegangan *input* ditambah dengan tegangan *noise* seperti pada Gambar 3.2 yaitu pada amplitudo tegangan *input* yang masuk ke op amp menjadi keriting dan bentuk tegangan *output* karena tegangan *input* tanpa *noise* dan tegangan output karena tegangan input kena noise seperti pada gambar 3.2. Pada daerah perubahan (*crossing*) polaritas tegangan input tanpa *noise* terjadi satu kali dan tegangan *output* terjadi *crossing* satu kali, tetapi untuk tegangan input yang kena *noise* terjadi dua kali *crossing* dan pada tegangan *output*-nya juga dua kali *crossing* sehingga terjadi *false* (kesalahan) karena *input* yang asli *crossing* satu kali, tetapi di *output* terjadi *crossing* dua kali.

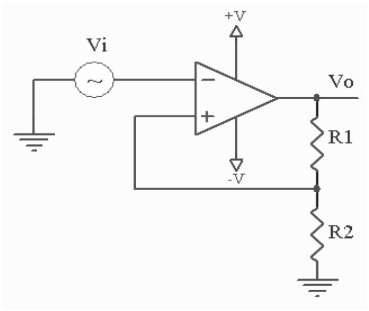


Gambar 3.2 *Bentuk gelombang output karena input mendapat noise*

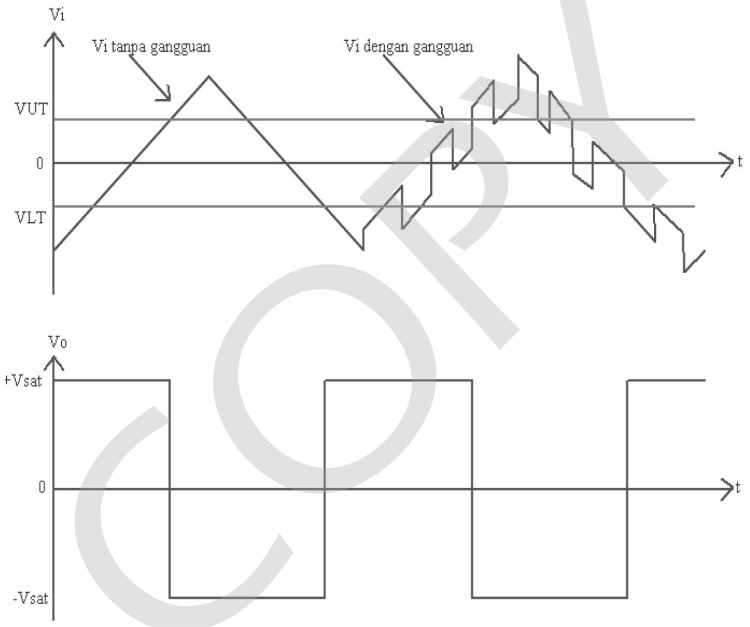
3.2 Detektor Pembalik Penyilang Nol dengan Histerisis (Inverting Zero Crossing Detector With Hysterisis atau IZCD With Hysterisis)

Untuk mengatasi permasalahan adanya tegangan noise maka ditambahkan suatu umpan balik (*feed back*) dari tegangan *output* ke masukan positif *input* atau dinamakan umpan balik positif (*positive feedback*). Ciri dari sebuah komparator adalah adanya umpan balik positif. Gambar 3.3 adalah sebuah *inverting comparator* atau *inverting zero crossing detector* dengan histerysis yang mempunyai umpan balik positif. Sedangkan hubungan bentuk tegangan *input* dengan tegangan *output* seperti pada Gambar 3.4 dan berikutnya adalah prinsip kerjanya.

COPY



Gambar 3.3 *Rangkaian Inverting zero crossing detector dengan hiterisis*



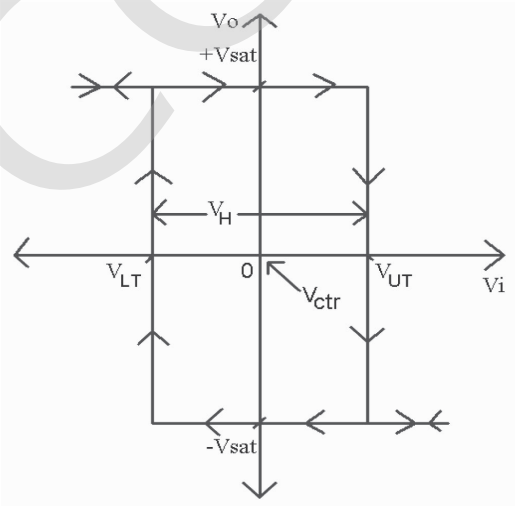
Gambar 3.4 *Hubungan tegangan input dan output dari IZCD dengan histerisis*

Prinsip kerja rangkaian IZCD dengan histerisis: Tegangan keluaran (*output*) Vo dari sebuah pembanding (*comparator*) sebuah Op-amp adalah dua kemungkinan yaitu tegangan +Vsat atau –Vsat. Ciri daripada sebuah pembanding adalah tegangan umpan balik masuk pada masukan (+) Op-amp atau dinamakan umpan balik positif (*positive feed back*). Pada rangkaian IZCD waktu diaktifkan pertama kali, misalkan tegangan *output* Vo berada pada +Vsat maka akan ada tegangan umpan balik yang masuk masukan (+) Op-amp sebesar $\frac{R2}{R1+R2}(+Vsat)$. Karena tegangan umpan balik ini nilainya positif atau lebih besar dari tegangan umpan balik lainnya maka dinamakan tegangan ambang batas atas (*upper threshold voltage*) yang disingkat V_{UT}. Jadi, nilai $V_{UT} = \frac{R2}{R1+R2}(+Vsat)$. Tegangan Ed yang masuk ke Op-amp adalah menjadi $Ed = V_{UT} - Vi$. Selama tegangan input Vi lebih kecil dari V_{UT} maka Ed sama dengan positif dan tegangan *output* Vo sama dengan +Vsat. Apabila tegangan *input* Vi naik terus dan suatu saat lebih besar dari V_{UT} maka Ed menjadi negatif dan tegangan *output*

Vo berubah menjadi tegangan –Vsat. Karena tegangan *output* Vo = -Vsat maka tegangan umpan balik yang masuk masukan (+) Op-amp berubah menjadi sebesar $\frac{R2}{R1+R2}(-Vsat)$. Karena tegangan umpan balik ini nilainya negatif atau lebih kecil dari tegangan umpan balik V_{UT} maka dinamakan tegangan ambang batas bawah (*lower threshold voltage*) yang disingkat V_{LT}. Jadi, nilai $V_{LT} = \frac{R2}{R1+R2}(-Vsat)$. Tegangan Ed yang masuk ke Op-amp adalah $Ed = V_{LT} - Vi$. Selama tegangan *input* Vi lebih besar dari V_{LT} maka Ed sama dengan negatif dan tegangan *output* Vo sama dengan (-Vsat). Apabila tegangan *input* Vi turun terus dan suatu saat lebih kecil dari V_{LT} maka Ed berubah menjadi positif lagi dan tegangan *output* Vo berubah menjadi +Vsat dan seterusnya. Karena adanya ambang batas atas dan ambang batas bawah maka akan ada yang namanya tegangan histerisis (V_H) yaitu perbedaan tegangan ambang atas dan tegangan ambang bawah atau $V_H = V_{UT} - V_{LT}$. Selain adanya tegangan histerisis, ada pula tegangan tengah (*central voltage*) yang diberi simbol V_{ctr}. Tegangan tengah (*central voltage*) dirumuskan sebagai $V_{ctr} = \frac{V_{UT} - V_{LT}}{2}$. Gambar tegangan histerisis dan letak tegangan tengah dapat juga digambarkan dalam karakteristik *input-output* dari IZCD dengan histerisis seperti Gambar 3.5. Tegangan histerisis (V_H) dirancang lebih besar dari tegangan *noise* puncak ke puncak (*Vn peak to peak*) supaya tidak terjadi kesalahan (*false*) pada saat terjadi perpindahan (*crossing*) dari polaritas positif ke negatif atau sebaliknya.

$$V_{LT} = \frac{R2}{R1+R2}(-Vsat) \text{ dan } V_{UT} = \frac{R2}{R1+R2}(+Vsat) \quad (3.2)$$

dan (3.3)

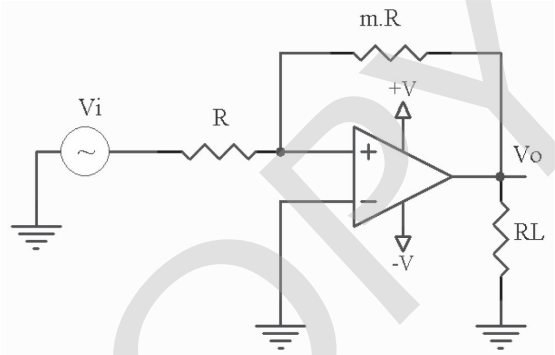


Gambar 3.5 *Karakteristik input-output dari IZCD dengan histerisis*

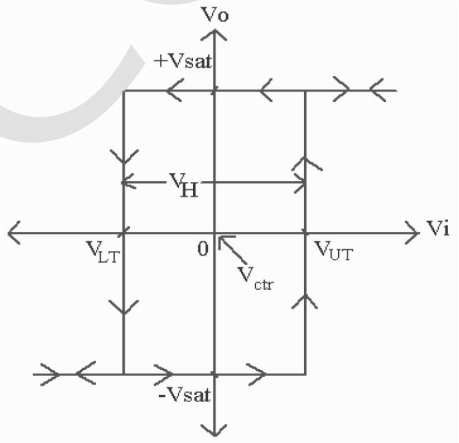
COPY

3.3 Detektor Tak Membalik Penyilang Nol dengan Histerisis (Non-Inverting Zero Crossing Detector With Hysterisis)

Rangkaian detektor penyilang-nol tak membalik yang bersifat *open loop* jika mendapat tegangan *noise* maka juga akan mengalami kesalahan pada tegangan *output* di sekitar *crossing*. Untuk mengatasi maka dipakai umpan balik positif sehingga akan ada tegangan histerisis karena ada tegangan ambang batas atas V_{UT} dan tegangan ambang batas bawah V_{LT}. Apabila tahanan *input* sebesar R dan tahanan umpan balik sama dengan m.R maka besarnya nilai tegangan ambang batas adalah $V_{UT} = \frac{-Vsat}{m}$, sedangkan $V_{LT} = \frac{+Vsat}{m}$. Selain itu, besarnya tegangan histerisis V_H dan tegangan tengah V_{ctr} juga sama. Besarnya tegangan histerisis adalah $V_H = V_{UT} - V_{LT}$ dan besarnya tegangan tengah adalah $V_{ctr} = \frac{V_{UT} - V_{LT}}{2}$.



Gambar 3.6 *Rangkaian NIZCD dengan histerisis*



Gambar 3.7 *Karakteristik input-output NIZCD dengan histerisis*

Contoh 3.1

Pada Gambar 3.6 diketahui ± V = ± 15 volt, ± Vsat = ± 13 volt, R = 10 K, mR = 50 K, RL = 50 K. Hitunglah V_{LT} dan V_{UT}, V_H, V_{ctr} dan gambarkan karakteristik *input-output*!

COPY

Penyelesaian:

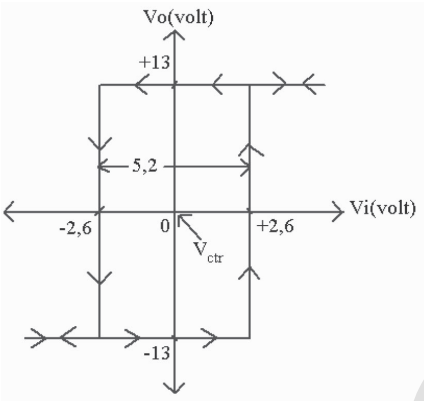
$$V_{LT} = \frac{+Vsat}{m} = -\frac{13V}{5} = -2{,}6V$$

$$V_{UT} = \frac{-Vsat}{m} = -\frac{-13V}{5} = +2{,}6V$$

$$V_H = V_{UT} - V_{LT} = 2{,}6 - (-2{,}6) = 5{,}2V$$

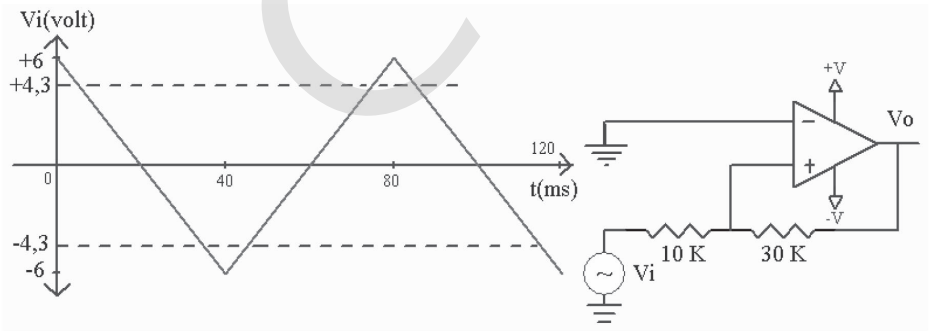
$$V_{ctr} = \frac{V_{UT} + V_{LT}}{2} = \frac{2{,}6V + (-2{,}6)}{2} = 0V$$

Karakteristik input-output:



Contoh 3.2

Diketahui op-amp mempunyai + V 15 volt, Vsat 13 volt, R = 10 K, mR = 30 K, RL = 10 K. Hitunglah V_{LT} dan V_{UT}, V_H, V_{ctr}, t_H, t_L, *duty cycle* dan gambarkan tegangan Vo!



Penyelesaian:

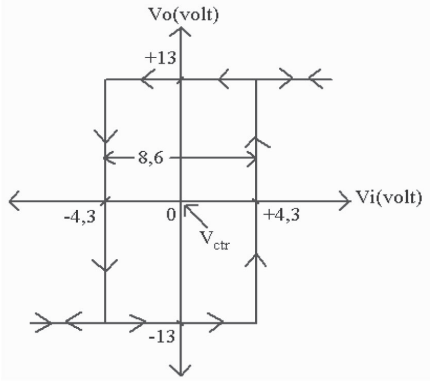
$$V_{LT} = \frac{+Vsat}{m} = -\frac{13V}{3} = -4{,}3V$$

$$V_{UT} = \frac{-Vsat}{m} = -\frac{-13V}{3} = +4{,}3V$$

$$V_H = V_{UT} - V_{LT} = 4{,}3 - (-4{,}3) = 8{,}6V$$

$$V_{ctr} = \frac{V_{UT} + V_{LT}}{2} = \frac{4{,}3V + (-4{,}3V)}{2} = 0V$$

COPY



Untuk waktu: $0 < t < 40$: $Vi(t) = \frac{-12}{40}t + 6$

Pada saat t = t1, Vi(t) = $-4{,}3$ volt

Maka $-4{,}3 = \frac{-12}{40}t1 + 6$

$\frac{12}{40}t1 = 6 + 4{,}3$

$t1 = \frac{40}{12}.(10{,}3) = 34{,}3ms$

Untuk waktu: $40 < t < 80$: $Vi(t) = \frac{12V}{40}t + c$

Pada t = 40, Vi(t) = -6 volt

Maka $-6 = \frac{12}{40}.(40) + c$

Dan $Vi(t) = \frac{12}{40}.t - 18$

Pada saat t = t2, Vi(t) = 4,3 volt

Maka: $4{,}3 = \frac{12}{40}.t2 - 18$

$t1 = (4{,}3 + 18)\frac{40}{12} = 22{,}3.\frac{40}{12} = 74{,}3ms$

Untuk waktu: $80 < t < 120$: $Vi(t) = -\frac{12}{40}.t + c$

Pada t = 80, Vi(t) = 6 volt

Maka: $6 = -\frac{12}{40}.(80) + c$

$c = 6 + 24 = 30$

Dan $Vi(t) = -\frac{12}{40}.t + 30$

Pada saat t = t3, Vi(t) = $-4{,}3$ volt

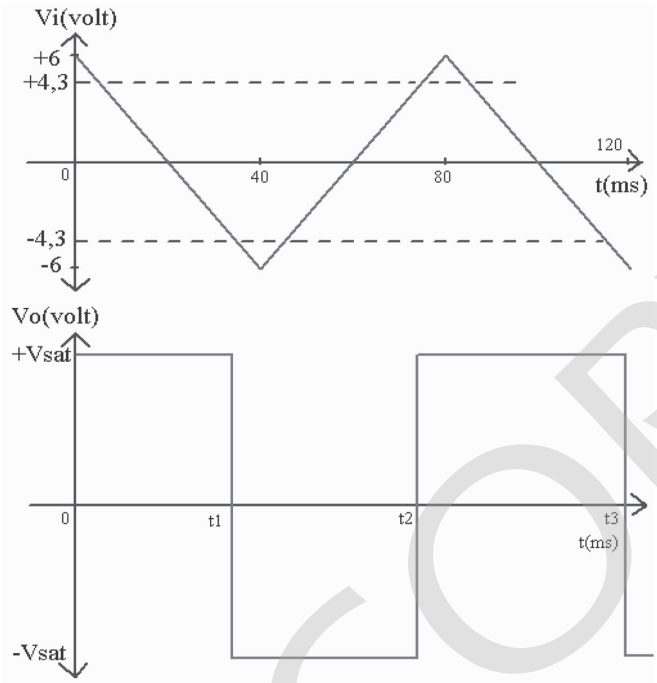
Maka: $-4{,}3 = -\frac{12}{40}.t3 + 30$

COPY

$$\frac{12}{40}.t3 = 30 + 4,3$$

$$t3 = 34,3.\frac{40}{12} = 114,3ms$$

Bentuk gelombang tegangan output (Vo).



Maka tH = t3 – t2 = 114,3 – 74,3 = 40 ms

tL = t2 – t1 = 74,3 – 34,3 = 40 ms

T = tH + tL = 40 + 40 = 80 ms

$$Dutycycle\,(DC) = \frac{tH}{T} \times 100\% = \frac{40}{80} \times 100\% = 50\%$$

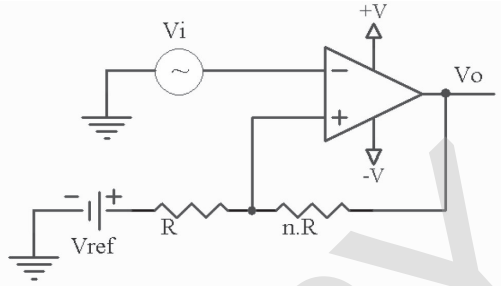
3.4 Detektor Pembalik Taraf Tegangan dengan Histerisis (*Inverting Voltage Level Detector With Hysterisis*)

Tahanan umpan balik yang menghubungkan tegangan *output* (Vo) dengan sisi bagian *input* yaitu pada positif *input* menghasilkan umpan balik positif sehingga rangkaiannya dinamakan komparator yang mempunyai histerisis karena tegangan *input* (Vi) masuk pada bagian negatif input maka dinamakan *inverting*. Apabila tegangan pembandingnya tidak nol tetapi suatu tegangan referensi (Vref) maka tegangan ambang batasnya merupakan akibat dari dua sumber tegangan yaitu sumber tegangan *output* (Vo) dan tegangan referensi sehingga didapatkan persamaan:

COPY

$$V_{UT} = \frac{n.R}{R+n.R}(Vref) + \frac{R}{R+n.R}(+Vsat) = \frac{n}{1+n}(Vref) + \frac{+Vsat}{1+n} \quad (3.4)$$

$$V_{LT} = \frac{n.R}{R+n.R}(Vref) + \frac{R}{R+n.R}(+Vsat) = \frac{n}{1+n}(Vref) + \frac{-Vsat}{1+n} \quad (3.5)$$



Gambar 3.8 *Rangkaian inverting voltage level detector dengan histerisis*

Tegangan histerisis (V_H) dan tegangan tengah (V_{ctr}) didapatkan dari (V_{LT}) dan (V_{UT}) menjadi:

$$V_H = V_{UT} - V_{LT} = \frac{(+Vsat) - (-Vsat)}{1+n} \quad (3.6)$$

$$V_{ctr} = = \frac{V_{UT} + V_{LT}}{2} = \frac{n}{1+n}.V_{ref} \quad (3.7)$$

Dari persamaan tegangan tengah (V_{ctr}) jika tegangan referensi (Vref) sama dengan positif maka karakteristiknya bergeser ke kanan dan *duty cycle* lebih dari 50% dan sebaliknya:

Contoh 3.3

Diketahui op-amp dengan + V = 15 volt, Vsat = 14 volt.
R = 10 K, nR = 40 K, Vref = 2 volt.

a. Hitunglah V_{LT} dan V_{UT}, V_H, V_{ctr}.
b. Gambarkan karakteristik input-output.

Penyelesaian:

$$V_{LT} = \frac{n}{1+n}(V_{ref}) + \frac{-Vsat}{1+n} = \frac{4}{1+4}.(2) + \frac{-14}{1+4} = 1{,}6 - 2{,}8 = -1{,}2\ V$$

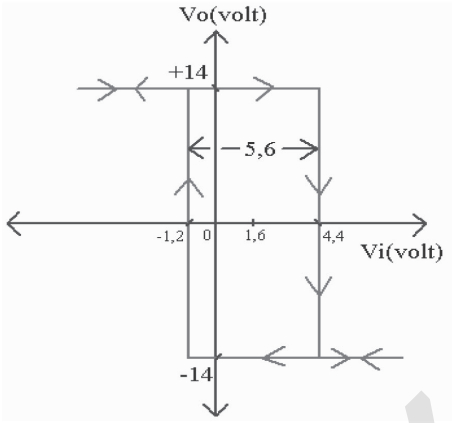
$$V_{UT} = \frac{n}{1+n}(V_{ref}) + \frac{+Vsat}{1+n} = \frac{4}{1+4}.(2) + \frac{14}{1+4} = 1{,}6 + 2{,}8 = 4{,}4\ V$$

$$V_H = V_{UT} - V_{LT} = 4{,}4 - (-1{,}2) = 5{,}6\ volt$$

$$V_{ctr} = \frac{V_{UT} + V_{LT}}{2} = \frac{4{,}4 + (-1{,}2)}{2} = 1{,}6\ volt$$

COPY

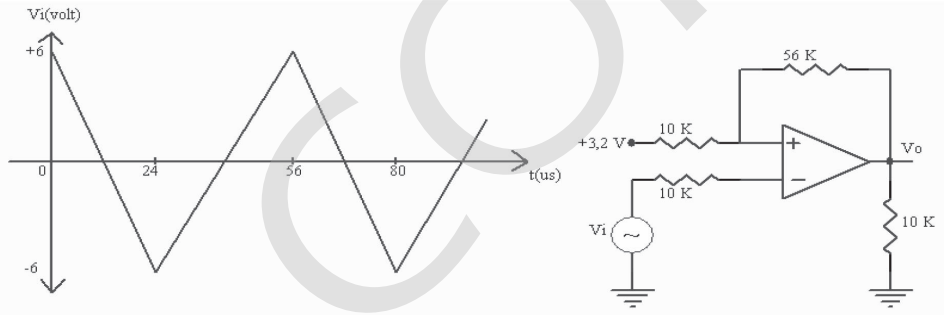
Karakteristik input-output:



Contoh 3.4

Diketahui op-amp dengan V = ± 15 volt, Vsat = ± 13 volt.

a. Hitunglah V_{LT} dan V_{UT}, V_H, V_{ctr}, t_H, t_L *duty cycle*.
b. Gambarkan tegangan *output* Vo.
c. Gambarkan karakteristik *input-output*.



Penyelesaian:

$$n = \frac{56}{10} = 5{,}6 \text{ dan } Vref = 3{,}2 \text{ volt}$$

Rangkaian *inverting voltage level detector* dengan histerisis, dengan Vref = positif maka *duty cycle*-nya adalah lebih dari 50 %.

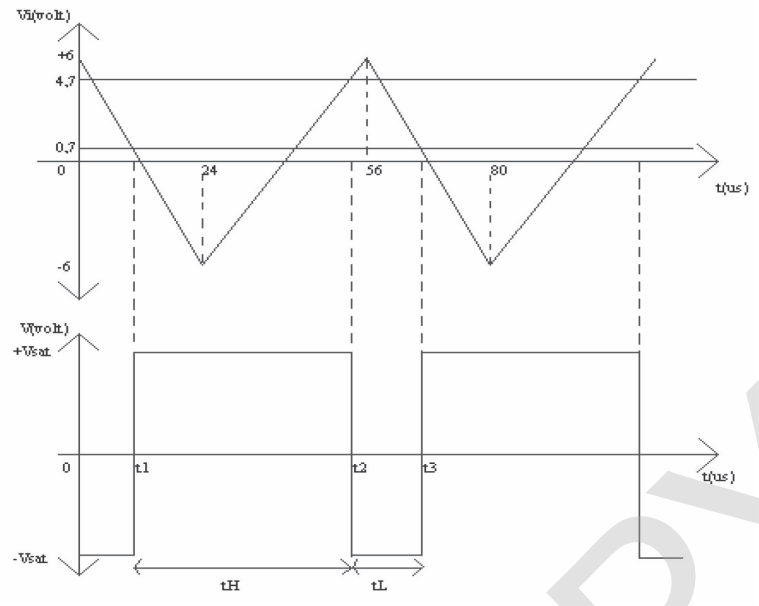
$$V_{UT} = \frac{n}{n+1}(V_{ref}) + \frac{+Vsat}{n+1} = \frac{5{,}6}{5{,}6+1}.(3{,}2) + \frac{13}{5{,}6+1} = 2{,}7 + 2 = 4{,}7 \; volt$$

$$V_{LT} = \frac{n}{n+1}(V_{ref}) + \frac{-Vsat}{n+1} = \frac{5{,}6}{5{,}6+1}.(3{,}2) + \frac{-13}{5{,}6+1} = 2{,}7 - 2 = 0{,}7 \; volt$$

$$V_H = V_{UT} - V_{LT} = \frac{(+Vsat) - (-Vsat)}{1+n} = \frac{13 + (-13)}{1 + 5{,}6} = 4 \; volt$$

$$V_{ctr} = \frac{V_{UT} + V_{LT}}{2} = \frac{n}{1+n}.(V_{ref}) = \frac{5{,}6}{1 + 5{,}6}(3{,}2) = 2{,}7 \; volt$$

COPY



Untuk waktu: $0 < t < 24$: $Vi(t) = \frac{-12}{24}t + 6$

$Vi(t) = -0,5.t + 6$

Pada saat t = t1, Vi(t) = 0,7 volt

Maka $0,7 = -0,5.t1 + 6$

$0,5.t1 = 6 - 0,7$

$t1 = \frac{5,3}{0,5} = 10,6\mu s$

Untuk waktu: $24 < t < 56$: $Vi(t) = \frac{12}{32}t + c$

Pada saat t = 24, Vi(t) = −6 volt

Maka: $-6 = \frac{12}{32}.(24) + c$

C = −15

Dan $Vi(t) = \frac{3}{8}t - 15$

Pada saat t = t2, Vi(t) = 4,7 volt

Maka: $4,7 = \frac{3}{8}.t2 - 15$

$\frac{3}{8}.t2 = 4,7 + 15$

$t2 = 52,53\ \mu s$

COPY

Untuk waktu: $56 < t < 80$: $Vi(t) = -0{,}5t + c$

Pada saat t = 56, Vi(t) = 6 volt

Maka: $6 = -0{,}5(56) + c$

C = 34

Dan $Vi(t) = -0{,}5.t + 34$

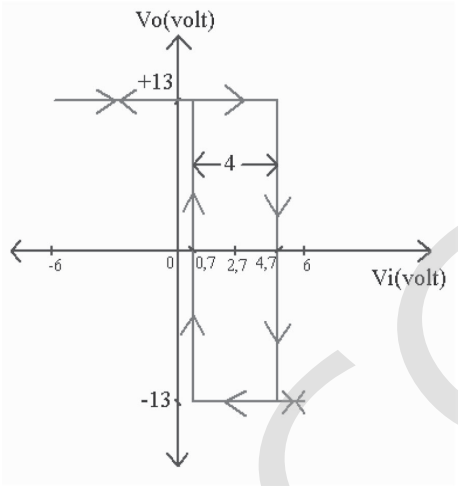
Pada saat t = t3, Vi(t) = 0,7 volt

Maka: $0{,}7 = -0{,}5.t3 + 34$

$0{,}5.t3 = 34 - 0{,}7$

$t3 = 66{,}6\ \mu s$

Karakteristik input-output:



Maka tH = t2 - t1 = 52,53 - 10,6 = 41,93 us

tL = t3 – t2 = 66,6 – 52,53 = 14,07 us

T = tH + tL = 41,93 + 14,07 = 56 us

Untuk waktu: $24 < t < 56$

$$Dutycycle(DC) = \frac{41{,}9}{56} \times 100\% = 74{,}88\%$$

3.5 Detektor Tak Pembalik Taraf Tegangan dengan Histerisis (*Non-Inverting Voltage Level Detector With Hysterisis*)

Tegangan output (Vo) yang terhubung dengan sisi bagian *input* pada positif *input* menghasilkan umpan balik positif dan tegangan *input* (Vi) juga masuk pada bagian positif *input* maka dinamakan *noninverting komparator*. Apabila tegangan pembandingnya tidak nol, tetapi suatu tegangan referensi (Vref) yang masuk pada bagian negatif *input* maka tegangan ambang batasnya merupakan akibat dari dua sumber tegangan yaitu

COPY

sumber tegangan *output* (Vo) dan tegangan referensi sehingga didapatkan persamaan ambang batas . Dengan menggunakan hukum Kirchoff I (hukum arus) pada titik masukan positif di mana arus yang masuk ke op-amp kecil sekali atau dianggap sama dengan nol sehingga arus yang menuju masukan positif dan arus yang keluar dari titik masukan positif sama maka persamaannya adalah

$$\frac{Vi - Vref}{R} = \frac{Vref - Vo}{m.R}$$

$$Vi - Vref = \frac{Vref - Vo}{m}$$

$$Vi = Vref + \frac{Vref}{m} - \frac{Vo}{m}$$

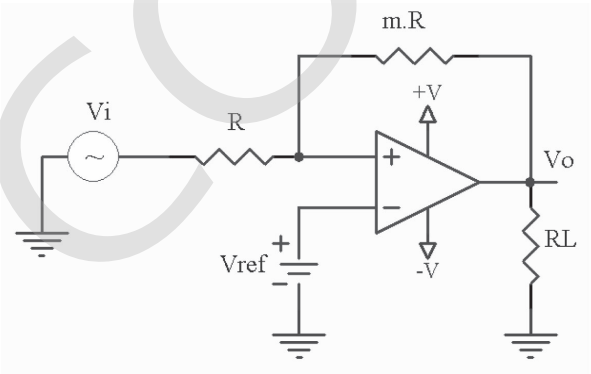
$$Vi = \left(1 + \frac{1}{m}\right)(Vref) - \frac{Vo}{m}$$

Apabila Vo = - Vsat maka ambang batasnya adalah

$$V_{UT} = \left(1 + \frac{1}{m}\right)(Vref) - \frac{-Vsat}{m} \qquad (3.8)$$

Apabila Vo = + Vsat maka ambang batasnya adalah

$$V_{LT} = \left(1 + \frac{1}{m}\right)(Vref) - \frac{+Vsat}{m} \qquad (3.9)$$



Gambar 3.9 *Rangkaian non-inverting voltage level detector dengan histerisis*

Tegangan histerisis (VH) dan tegangan tengah (V_{ctr}) didapatkan dari (V_{LT}) dan (V_{UT}) menjadi:

$$V_H = V_{UT} - V_{LT} = \frac{(+Vsat) - (-Vsat)}{m} = \frac{2.(+Vsat)}{m} \qquad (3.10)$$

$$V_{ctr} = \frac{V_{UT} + V_{LT}}{2} = \left(1 + \frac{1}{m}\right).(Vref) \qquad (3.11)$$

Dari persamaan tegangan tengah (V_{ctr}) jika tegangan referensi (Vref) sama dengan positif maka karakteristiknya bergeser ke kanan dan *duty cycle* kurang dari 50% dan sebaliknya:

COPY

Contoh 3.5

Diketahui pada Gambar 3.8. op-amp dengan ± V = ± 15 volt; ± Vsat = ± 14 volt.
R = 10 K, mR = 40 K, Vref = 2 volt.

a. Hitunglah V_{LT} dan V_{UT}, V_H, V_{ctr}!
b. Gambarkan karakteristik *input-output*!

Penyelesaian:

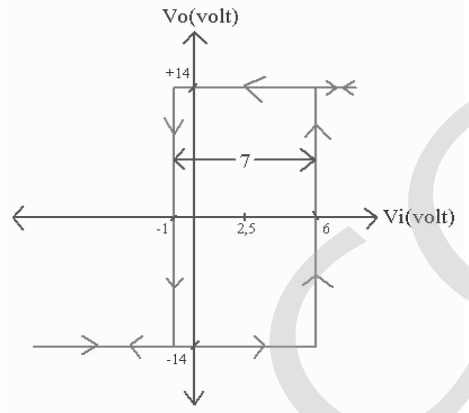
$$V_{LT} = \left(1 + \frac{1}{m}\right)(Vref) - \frac{+Vsat}{m} = \left(1 + \frac{1}{4}\right)(2) - \frac{+14}{4} = 2{,}5 - 3{,}5 = -1 \text{ volt}$$

$$V_{UT} = \left(1 + \frac{1}{m}\right)(Vref) - \frac{-Vsat}{m} = \left(1 + \frac{1}{4}\right)(2) - \frac{-14}{4} = 2{,}5 + 3{,}5 = 6 \text{ volt}$$

$$V_H = V_{UT} - V_{LT} = 6 - (-1) = 7 \text{ volt}$$

$$V_{ctr} = \frac{V_{UT} - V_{LT}}{2} = \frac{6 + (-1)}{2} = 2{,}5 \text{ volt}$$

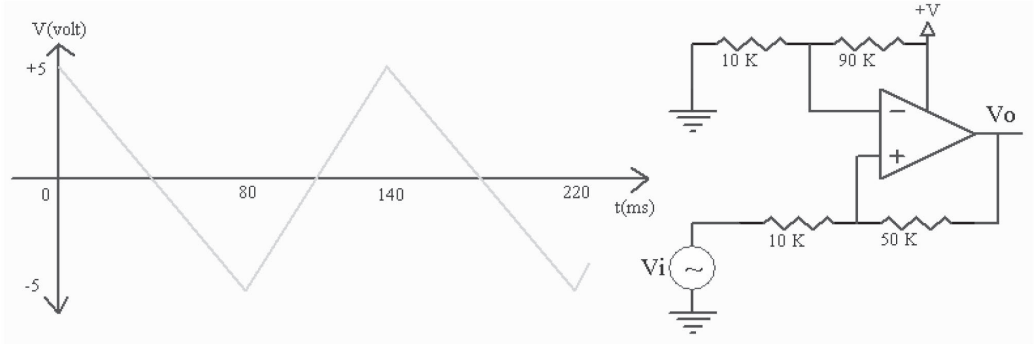
Karakteristik input-output:



Contoh 3.6

Diketahui op-amp dengan ± V = ± 15 volt, Vsat = ± 13 volt.

a. Hitunglah V_{LT} dan V_{UT}, V_H, V_{ctr}, t_H, t_L *duty cycle*!
b. Gambarkan tegangan output Vo!
c. Gambarkan karakteristik *input-output*.



COPY

Penyelesaian:

$m = \frac{mR}{m} = \frac{50}{10} = 5$ dan

$Vref = \frac{10K}{10K + 90K}(+15) = 1{,}5$ volt

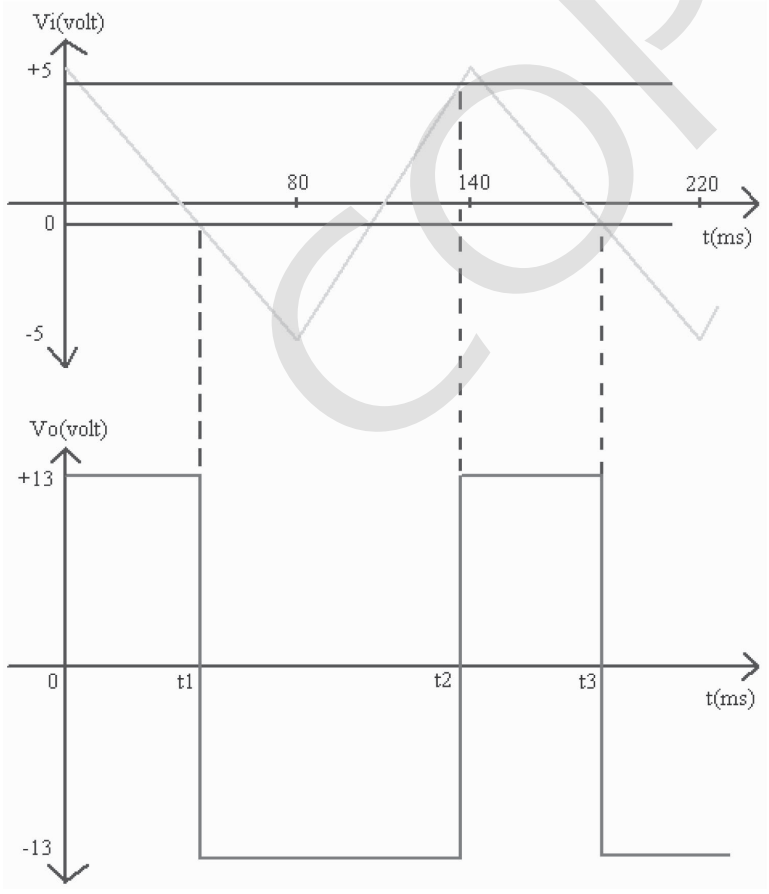
Rangkaian *noninverting voltage level detector* dengan histerisis, dengan Vref = positif maka *duty cycle*-nya adalah kurang dari 50 %.

$V_{LT} = \left(1 + \frac{1}{m}\right)(Vref) - \frac{+Vsat}{m} = \left(1 + \frac{1}{5}\right)(1{,}5) - \frac{+13}{5} = 1{,}8 - 2{,}6 = -0{,}8$ volt

$V_{UT} = \left(1 + \frac{1}{m}\right)(Vref) - \frac{-Vsat}{m} = \left(1 + \frac{1}{5}\right)(1{,}5) - \frac{-13}{5} = 1{,}8 + 2{,}6 = 4{,}4$ volt

$V_H = V_{UT} - V_{LT} = 4{,}4 - (-0{,}8) = 5{,}2$ volt

$V_{ctr} = \frac{V_{UT} - V_{LT}}{2} = \frac{4{,}4 + (-0{,}8)}{2} = 2{,}2 - 0{,}4 = 1{,}8$ volt



COPY

Untuk waktu: $0 < t < 80$: $Vi(t) = \frac{-10}{80}t + 5$

Pada saat t = t1, Vi(t) = $-0{,}8$ volt

Maka: $-0{,}8 = \frac{-10}{80}t1 + 5$

$\frac{1}{8}t1 = 5 + 0{,}8$

$t1 = 40 + 6{,}4 = 46{,}4ms$

Untuk waktu: $80 < t < 140$: $Vi(t) = \frac{10}{60}t + c$

Pada saat t = 80, Vi(t) = -5 volt

Maka: $-5 = \frac{1}{6}(80) + c$

$c = -5 - \frac{80}{6} = -5 - 13\frac{2}{6} = -18\frac{2}{6}$

Dan $Vi(t) = \frac{1}{6}t - 18\frac{2}{6}$

Pada saat t = t2, Vi(t) = 4,4 volt

Maka: $4{,}4 = \frac{-1}{6}t2 - 18\frac{2}{6}$

$\frac{1}{6}.t2 = 4{,}4 + 18\frac{2}{6}$

$t2 = 26{,}4 + 110 = 136{,}4ms$

Untuk waktu: $140 < t < 220$: $Vi(t) = -\frac{10}{80}.t + c$

Pada saat t = 140, Vi(t) = 5 volt

Maka: $5 = -\frac{1}{8}.(140) + c$

$c = 17\frac{4}{8} + 5 = 22{,}5$

Dan $Vi(t) = -\frac{1}{8}.t + 22{,}5$

Pada saat t = t3, Vi(t) = $-0{,}8$ volt

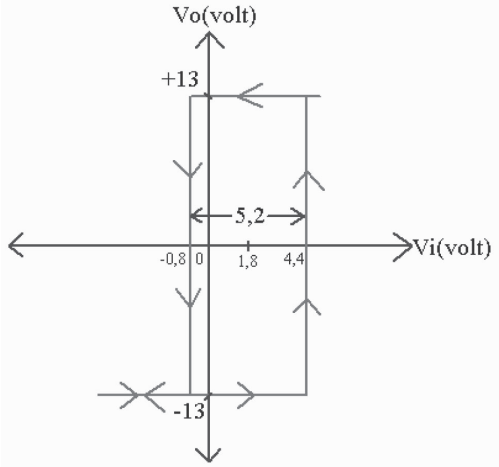
Maka: $-0{,}8 = -\frac{1}{8}.t3 - 22{,}5$

$\frac{1}{8}.t3 = 22{,}5 + 0{,}8 = 23{,}3$

$t3 = 186{,}4ms$

COPY

Karakteristik *input-output*:



Maka tH = t3 – t2 = 186,4 - 136,4 = 50 ms

tL = t2 – t1 = 136,4 – 46,4 = 90 ms

T = tH + tL = 50 + 90 = 140 ms

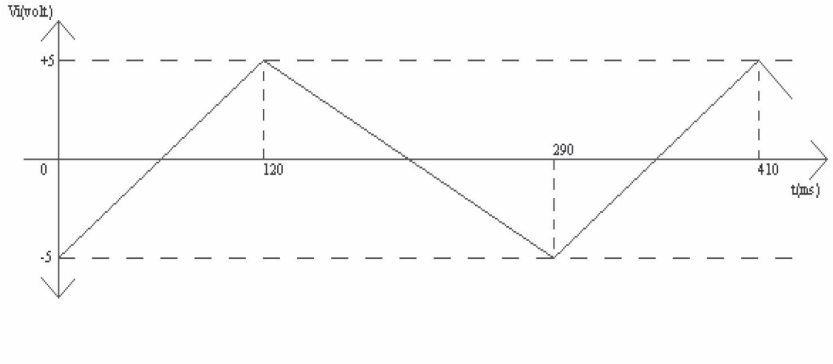
$$Dutycycle\,(DC) = \frac{50}{140} \times 100\% = 35{,}7\%$$

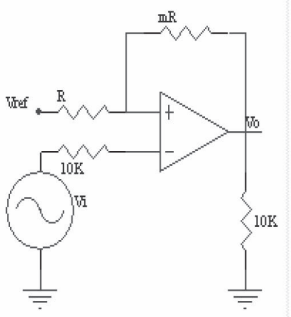
Contoh 3.7

Diketahui op-amp dengan ± V = ± 15 volt; ± Vsat = ± 14 volt.
Rencanakan rangkaian *voltage level detector* dengan histerisis agar didapat tegangan output dengan *duty cycle* = 30 %.

Penyelesaian:

Ada dua rangkaian *voltage level detector* yaitu IVLD dengan histerisis dan NIVLD dengan histerisis.
** Apabila jenis IVLD dengan histerisis dan *duty cycle* = 30 % maka Vref = negatif.





COPY

T = 290 ms

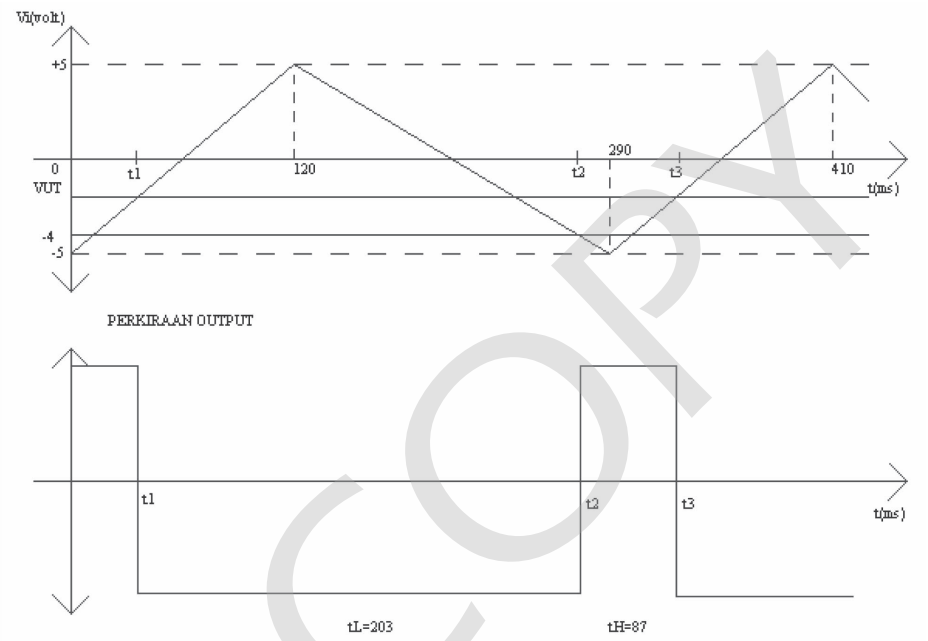
$t_H = 30\% \times 290 = 87$ ms

$t_L = 70\% \times 290 = 203$ ms

$$Vctr = \left(\frac{n}{n+1}\right).\text{Vref}$$

$$VH = \frac{2.Vsat}{n+1}$$

Dipilih: $V_{LT} = -4$volt



Untuk waktu: 120 < t < 290: Persamaan: $Vi(t) = -\frac{10}{170}.t + c$

Pada saat t = 140, Vi(t) = +5 volt

sehingga: $5 = -\frac{1}{17}.(120) + c$

$$c = 5 + 7\frac{1}{17} = 12\frac{1}{17}$$

$$Vi(t) = -\frac{1}{17}.t + 12\frac{1}{17}$$

Pada saat Vi(t) = VLT = −4 volt maka t = t2

$$-4 = -\frac{1}{17}.t2 + 12\frac{1}{17}$$

$$\frac{1}{17}.t2 = 4 + 12\frac{1}{17}$$

$$\frac{1}{17}.t2 = \frac{273}{17} \text{ maka } t2 = 273\ ms$$

t3 = t2 + tH = 273 + 87 = 360 ms

COPY

Untuk waktu: 290 < t < 410: Persamaan: $Vi(t) = \frac{1}{12}.t + c$

Pada saat t = 290, Vi(t) = −5 volt

$-5 = \frac{1}{12}.(290) + c$

$c = -5 - 24\frac{2}{12} = -29\frac{1}{6}$

sehingga: $Vi(t) = \frac{1}{12}.t - 29\frac{1}{6}$

Pada saat t = t3 = 360 ms, $Vi(t)$ = VUT

$V_{UT} = \frac{1}{12}.(360) - 29\frac{1}{6} = 30 - 29\frac{1}{6} = \frac{5}{6} = 0{,}83$ volt

$V_H = V_{UT} - V_{LT} = 0{,}83 - (-4) = 4{,}83$ volt

$V_{ctr} = \frac{VUT + VLT}{2} = \frac{0{,}83 - 4}{2} = -1{,}59$ volt

$n + 1 = \frac{2.Vsat}{VH} = \frac{2.14}{4{,}83} = 58$ ..... $n = 4{,}8$

$Vref = \frac{n+1}{n}.Vctr = \frac{4{,}8 + 1}{4{,}8}.(-1{,}59) = -1{,}92$ *volt*

Perbandingan R1 dan R2 apabila R2 = 10 K.

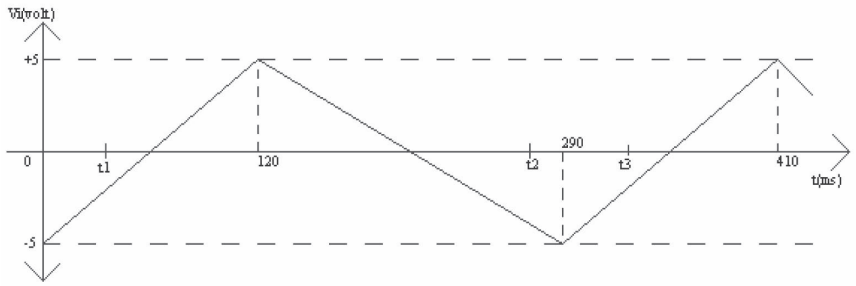
$\frac{R2}{R1+R2}.(-V) = -1{,}92 ..... \frac{10}{R1+10}.(-15) = -1{,}92$

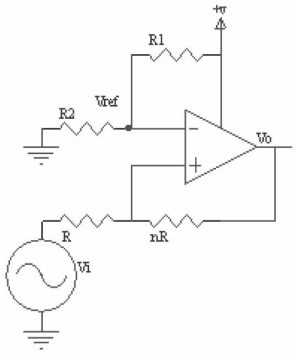
$-1{,}92.R1 = -150 + 19{,}2$

$R1 = 68{,}125K\Omega$

Jika R = 10 K maka nR = 48 K.

**** Apabila jenis NIVLD dengan histerisis dan *duty cycle* = 30 % maka Vref = positif.





COPY

T = 290 ms

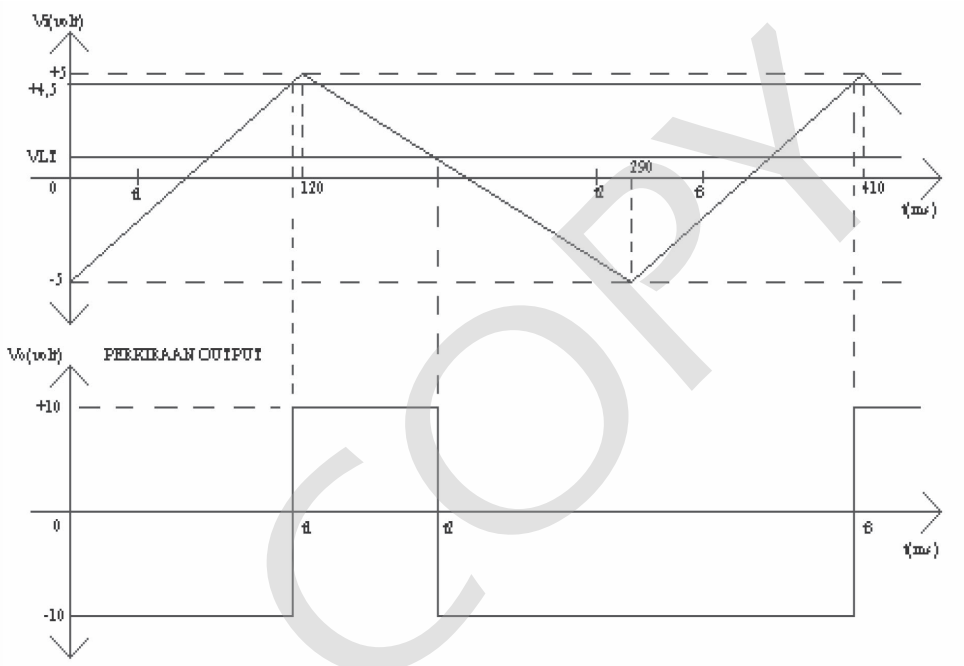
t_H = 30%×290 = 87 ms

t_L = 70%×290 = 203 ms

$Vctr = \left(1 + \frac{1}{n}\right).Vref$

$VH = \frac{2.Vsat}{n}$

Dipilih: V_{UT} = +4,5 volt



Untuk waktu: 0 < t < 120: Persamaan:

$Vi(t) = \frac{1}{12}.t + c$

Pada t = 0, Vi(t) = −5 volt

Maka: $-5 = \frac{1}{12}.(0) + c$

$c = -5$

sehingga: $Vi(t) = \frac{1}{12}.t - 5$

Pada saat t = t1, Vi(t) = VUT = 4,5 volt

$V_{UT} = \frac{1}{12}.(t1) - 5$...maka... $\frac{1}{12}.t1 = 4,5 + 5 = 9,5$....dan.... $t1 = 114$ detik

Untuk t2 = t1 + tH = 114 + 87 = 201 detik

COPY

Untuk waktu: 120 < t < 290: Persamaan:

$Vi(t) = -\frac{10}{170}.t + c$

Pada t = 120, Vi(t) = +5 volt

sehingga: $5 = -\frac{1}{17}.(120) + c$

$c = 5 + 7\frac{1}{17} = 12\frac{1}{17}$

$Vi(t) = -\frac{1}{17}.t + 12\frac{1}{17}$

Pada saat t = t2 = 201 detik maka Vi(t) = VLT

$V_{LT} = -\frac{1}{17}.t2 + 12\frac{1}{17}$

$V_{LT} = -\frac{201}{17} + 12\frac{1}{17}$

$V_{LT} = \frac{-201+205}{17} = \frac{4}{17} = 0{,}24$ volt

t3 = t2 + tL = 201 + 203 = 404 ms

$V_{UT} = 4{,}5$ volt

$V_{LT} = 0{,}24$ volt

$V_H = V_{UT} - V_{LT} = 4{,}5 - (0{,}24) = 4{,}26$ volt

$V_{ctr} = \frac{V_{UT} + V_{LT}}{2} = \frac{0{,}24 + 4{,}5}{2} = 2{,}37$ volt

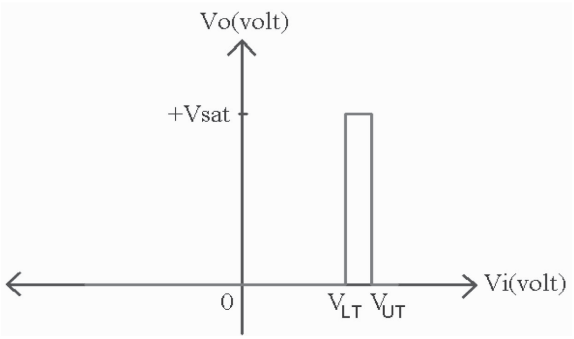
$n = \frac{2.Vsat}{V_H} = \frac{2.14}{4{,}26} = 6{,}57$

$V_{ctr} = \left(1 + \frac{1}{n}\right) Vref \ldots maka \ldots Vref = \frac{V_{ctr}}{1 + \frac{1}{n}} = \frac{2{,}37}{1 + \frac{1}{6{,}57}} = \frac{2{,}37}{1{,}15} = 2{,}06$ volt

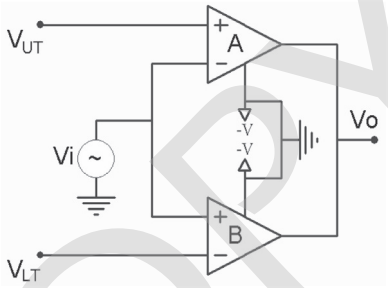
3.6 Detektor Jendela (*Windows Detector*)

Detektor jendela adalah rangkaian komparator atau detektor di mana hubungan tegangan *input* dengan tegangan *output* membentuk suatu jendela. Jendela yang terbentuk mempunyai batas bawah V_{LT} dan batas atas V_{UT}. Jika tegangan *input* di bawah V_{LT} atau di atas V_{UT} maka tegangan *output* sama dengan nol dan apabila tegangan input antara V_{LT} dan V_{UT} maka tegangan *output* sama dengan +Vsat. Hubungan tegangan *input* dan tegangan *output* seperti berikut:

COPY



Sedangkan rangkaian detektor jendela dengan hubungan *input-output* seperti di atas adalah



Contoh 3.8

Diketahui detektor jendela dengan batas-batas V_{LT} = 4 volt dan V_{UT} = 5 volt. Tegangan *output* yang dihasilkan dihubungkan dengan sebuah LED, jika tegangan *input* di bawah V_{LT} atau di atas V_{UT} maka LED menyala dan jika tegangan *input* antara V_{LT} dan V_{UT} maka LED padam. Rancanglah dengan op-amp dengan data ± V = ± 15 volt; ± Vsat = ± 14 volt. Gambarkan karakteristik *input-output*.

Penyelesaian:

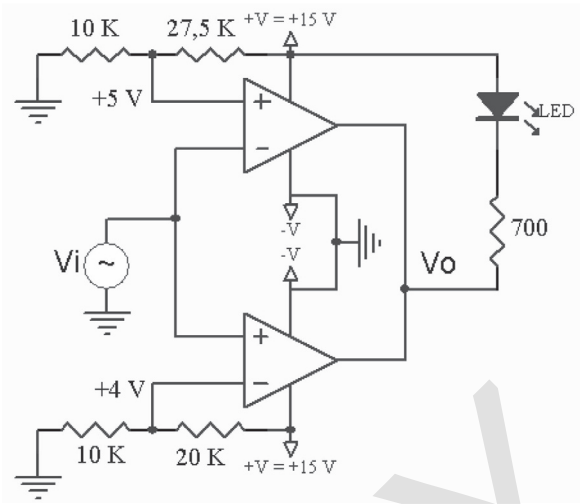
Tegangan power supply untuk op-amp + V = + 15 volt, sedangkan –V = 0 volt.

Tegangan ambang batas bawah didapat dari rangkaian pembagi tegangan $V_{LT} = \frac{R2}{R1+R2}.(+V)$. Jika R1 = 10 K maka R2 didapatkan $4 = \frac{10}{10+R2}.(+15)$ atau $R2 = \frac{150-40}{4} = \frac{110}{4} = 27{,}5\text{K}\Omega$.

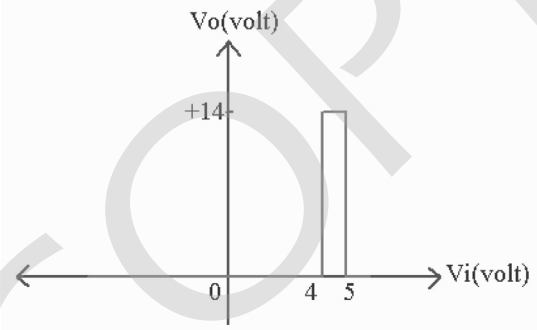
Untuk tegangan ambang batas atas didapat dari $V_{UT} = \frac{R3}{R3+R4}.(+V)$. Jika R3 = 10 K maka R4 didapatkan $5 = \frac{10}{10+R4}.(+15)$ atau $R4 = \frac{150-50}{5} = 20\text{K}\Omega$.

Pada saat dioda menyala maka arus yang lewat 20 mA dan tegangan drop pada dioda 1 volt sehingga nilai resistor dioda adalah $R_D = \frac{+V-Vd}{Id} = \frac{15V-1V}{20mA} = \frac{14}{20} = 0{,}7\text{K} = 700\Omega$.

COPY

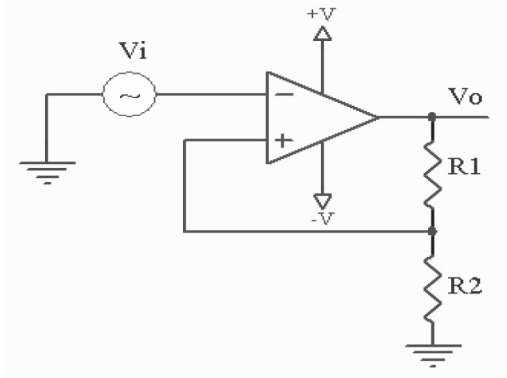


Karakteristik *input-output* dari detektor jendela.



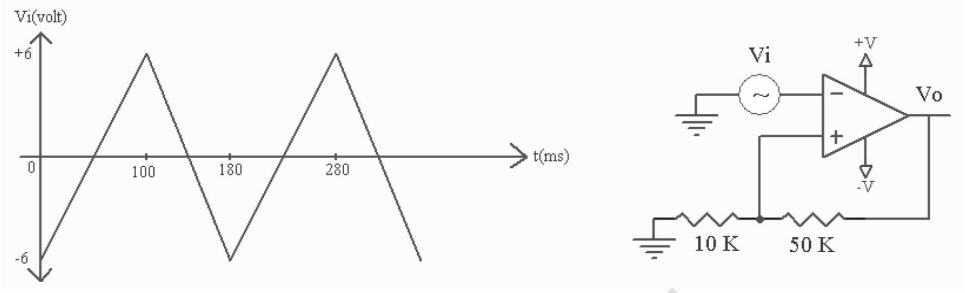
Latihan Soal

1. Diketahui rangkaian *inverting zero crossing detector* (IZCD) dengan histerisis dengan op-amp dan datanya adalah ± V = ± 12 volt, ± Vsat = ± 10 volt, R1 = 10 K, R2 = 50 K. Hitunglah V_{LT} dan V_{UT}, V_H, V_{ctr} dan gambarkan karakteristik *input-output*!

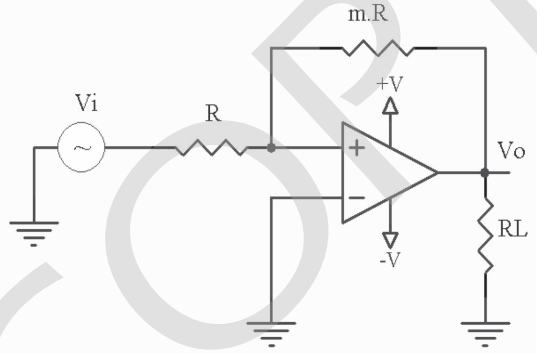


COPY

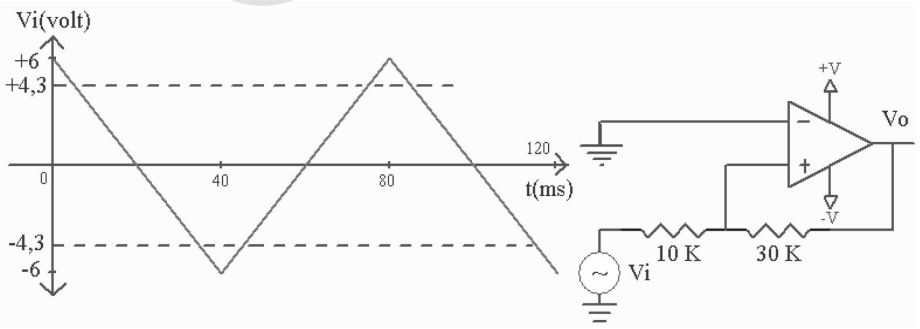
2. Diketahui op-amp mempunyai ± V = ± 12 volt, ± Vsat = ± 10 volt . Hitunglah V_{LT} dan V_{UT}, V_H, V_{ctr}, t_H, t_L *duty cycle* dan gambarkan tegangan Vo!



3. Diketahui rangkaian *non-inverting zero crossing detector* (NIZCD) dengan histerisis dengan op-amp dan datanya adalah ± V = ± 12 volt, ± Vsat = ± 10 volt, R = 10 K, mR = 50 K, RL = 10 K . Hitunglah V_{LT} dan V_{UT}, V_H, V_{ctr} dan gambarkan karakteristik input-output!

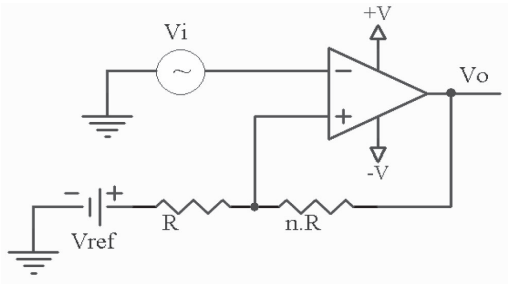


4. Diketahui op-amp mempunyai ± V = ± 12 volt, ± Vsat = ± 10 volt, R = 10 K, mR = 30 K, RL = 10 K. Hitunglah V_{LT} dan V_{UT}, V_H, V_{ctr}, t_H, t_L *duty cycle* dan gambarkan tegangan Vo!

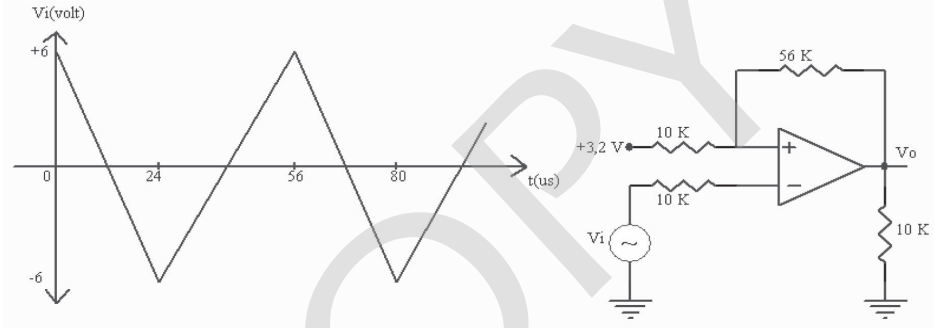


5. Diketahui rangkaian *inverting voltage level detector* (IVLD) dengan histerisis dengan op-amp dan datanya adalah ± V = ± 12 volt, ± Vsat = ± 10 volt, R = 10 K, nR = 40 K, RL = 10 K . Hitunglah V_{LT} dan V_{UT}, V_H, V_{ctr}, dan gambarkan karakteristik *input-output*!

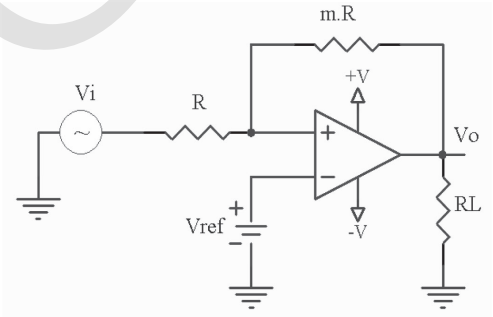
COPY



6. Diketahui op-amp mempunyai ± V = ± 12 volt, ± Vsat = ± 10 volt, R = 10 K, nR = 56 K, RL = 10 K. Hitunglah V_{LT} dan V_{UT}, V_H, V_{ctr}, t_H, t_L *duty cycle* dan gambarkan tegangan Vo!

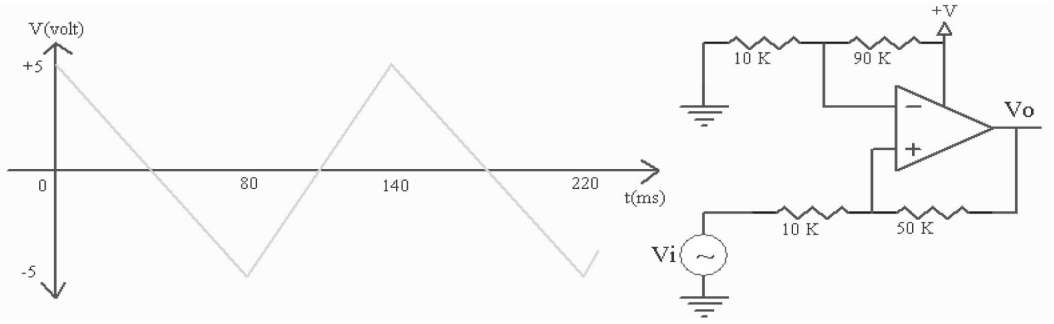


7. Diketahui rangkaian *non-inverting voltage level detector* (NIVLD) dengan histerisis dengan op-amp dan datanya adalah ± V = ± 12 volt, ± Vsat = ± 10 volt, R = 10 K, mR = 40 K, RL = 10 K . Hitunglah V_{LT} dan V_{UT}, V_H, V_{ctr}, dan gambarkan karakteristik *input-output*!

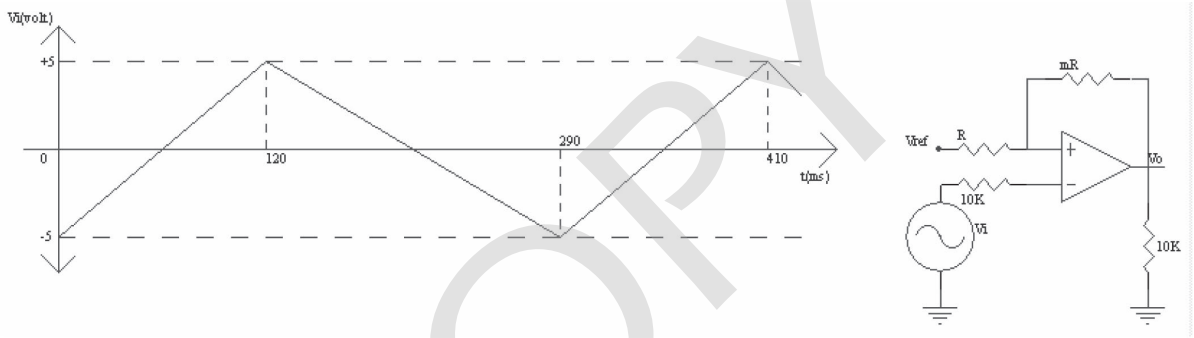


8. Diketahui op-amp mempunyai ± V = ± 12 volt, ± Vsat = ± 10 volt, R = 10 K, mR = 50 K, RL = 10 K. Hitunglah V_{LT} dan V_{UT}, V_H, V_{ctr}, t_H, t_L *duty cycle* dan gambarkan tegangan Vo.

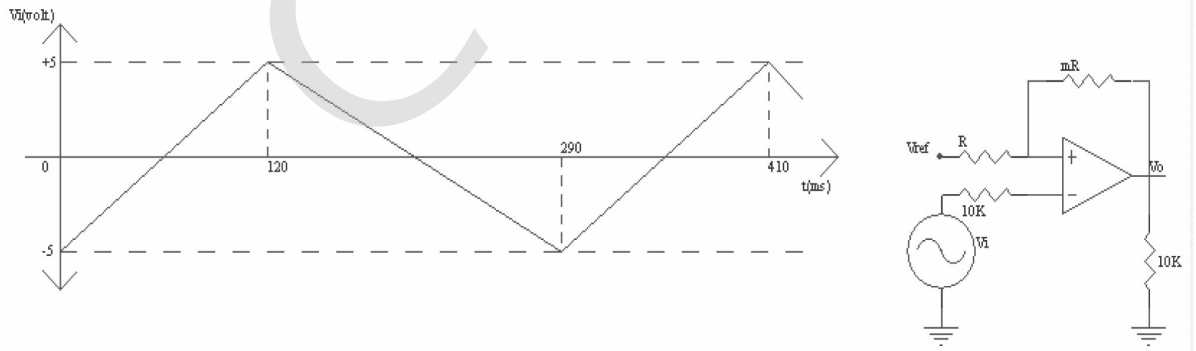
COPY



9. Diketahui op-amp dengan ± V = ± 12 volt; ± Vsat = ± 10 volt. Rencanakan rangkaian *voltage level detector* dengan histerisis agar didapat tegangan *output* dengan *duty cycle* = 30 %.



10. Diketahui op-amp dengan ± V = ± 15 volt; ± Vsat = ± 14 volt. Rencanakan rangkaian *voltage level detector* dengan histerisis agar didapat tegangan *output* dengan *duty cycle* = 60 %.



11. Rancanglah detektor jendela dengan batas-batas V_{LT} = 3 volt dan V_{UT} = 5 volt. Tegangan *output* yang dihasilkan dihubungkan dengan sebuah LED jika tegangan *input* di bawah V_{LT} atau di atas V_{UT} maka LED menyala dan jika tegangan *input* antara V_{LT} dan V_{UT} maka LED padam. Rancanglah dengan op-amp dengan data ±V = ±12 volt; -V = 0 volt; ± Vsat = ± 10 volt. Gambarkan karakteristik *input-output*!

COPY

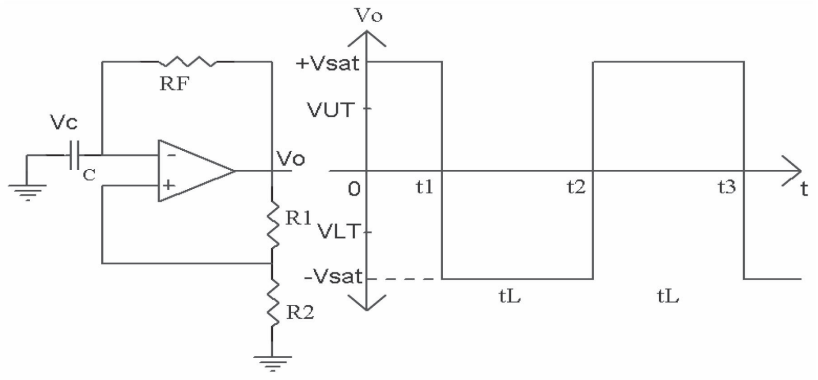
BAB 4

Pembangkit Sinyal (*Signal Generator*)

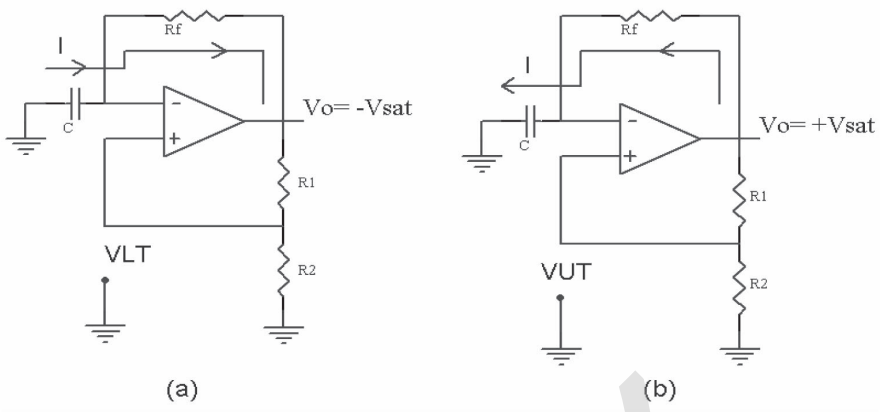
COPY

Peralatan elektronika hampir semuanya membutuhkan rangkaian pembangkit sinyal (*signal generator*) sebagai salah satu bagiannya. Pembangkit sinyal ini terdiri dari pembangkit gelombang persegi (*astable multivibrator*), pembangkit gelombang satu tembakan (*one shot multivibrator*), pembangkit gelombang segi-tiga (*triangle wave generator*), pembangkit gelombang gigi-gergaji (saw thoot wave generator), pembangkit gelombang sinus (*osilator*). Ciri daripada pembangkit sinyal (*multivibrator* atau *osilator*) adalah adanya umpan balik positif (pada komparator) dan umpan balik negatif (pada amplifier).

4.1 Pembangkit Gelombang Persegi (Astable Multivibrator)



Gambar 4.1 *Rangkaian astable multivibrator*



Gambar 4.2 *Rangkaian astable multivibrator apabila (a) Vo = -Vsat dan (b) Vo = +Vsat*

Menghitung tL (waktu rendah/low time) yaitu kapasitor melepas muatan (discharge) seperti pada Gambar 4.2(a) persamaan tegangan pada kapasitor (Vc) adalah

$$Vc = A.e^{-\frac{t}{\tau}} + V(\sim) = \{V(0) - V(\sim)\}.e^{-\frac{t}{\tau}} + V(\sim) \qquad (4.1)$$

$$V(0) = V_{UT} = \frac{R2}{R1 + R2}(+Vsat)$$

$$V(\sim) = -Vsat$$

$$Vc = \left\{\frac{R2}{R1 + R2}(+Vsat) - (-Vsat)\right\}.e^{-\frac{t}{\tau}} + (-Vsat)$$

$$Vc = \left\{\frac{R2 + (R1 + R2)}{R1 + R2}(+Vsat)\right\}.e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{R1 + R2}{R1 + R2}(-Vsat)$$

Pada saat t = tL nilai $Vc = V_{LT} = \frac{R2}{R1 + R2}(-Vsat)$

$$\frac{R2}{R1 + R2}(-Vsat) = \left\{\frac{R1 + 2R2}{R1 + R2}(+Vsat)\right\}.e^{-\frac{t_L}{\tau}} + \frac{R1 + R2}{R1 + R2}(-Vsat)$$

$$-R2 = \{R1 + 2R2\}.e^{-\frac{t_L}{\tau}} - (R1 + R2)$$

$\left\{\frac{R1}{R1 + 2R2}\right\} = e^{-\frac{t_L}{\tau}}$ dilogaritmakan dengan ln.

$$\ln\left\{\frac{R1}{R1 + 2R2}\right\} = -\frac{t_L}{\tau}$$

$t_L = \tau \ln\left\{\frac{R1 + 2R2}{R1}\right\}$ dimana τ adalah konstanta waktu (*time constant*) sebesar $\tau = Rf.C$

$$t_L = Rf.C.\ln\left\{\frac{R1 + 2R2}{R1}\right\} \qquad (4.2)$$

COPY

Menghitung tH (waktu tinggi/*high time*) yaitu kapasitor diisi muatan (*charge*) seperti pada Gambar 4.2(b) persamaan tegangan pada kapasitor (Vc) adalah

$$Vc = A.\left\{1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right\} + V(0) = \{V(\sim)-V(0)\}\left\{1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right\} + V(0) \quad (4.3)$$

$$V(0) = V_{LT} = \frac{R2}{R1 + R2}(-Vsat)$$

$$V(\sim) = +Vsat$$

$$Vc = \left\{\frac{(R1 + R2)+R2)}{R1 + R2}(+Vsat)\right\}.\left\{1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right\}+\frac{R2}{R1 + R2}(-Vsat)$$

Pada saat t = tH nilai $Vc = V_{UT} = \frac{R2}{R1 + R2}(+Vsat)$

$$\frac{R2}{R1 + R2}(+Vsat) = \left\{\frac{R1+2R2}{R1 + R2}(+Vsat)\right\}.\left\{1-e^{-\frac{t_H}{\tau}}\right\} + \frac{R2}{R1 + R2}(-Vsat)$$

$$R2 = \{R1+2R2\}.\left\{1-e^{-\frac{t_H}{\tau}}\right\}-R2$$

$$-R2 = -(R1+2R2).e^{-\frac{t_H}{\tau}}$$

$\left\{\frac{R1}{R1 + 2R2}\right\} = e^{-\frac{t_H}{\tau}}$ dilogaritmakan dengan ln.

$$\ln\left\{\frac{R1}{R1 + 2R2}\right\} = -\frac{t_H}{\tau}$$

$t_H = \tau\ln\left\{\frac{R1 + 2R2}{R1}\right\}$ dimana τ adalah konstanta waktu (*time constant*) sebesar $\tau = Rf.C$

$$t_H = Rf.C.\ln\left\{\frac{R1 + 2R2}{R1}\right\} \quad (4.4)$$

Periode = T adalah

$$T = t_L + t_H = 2Rf.C.\ln\left\{\frac{R1 + 2R2}{R1}\right\}\text{detik} \quad (4.5)$$

Frekuensi osilasi adalah $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2Rf.C.\ln\left\{\frac{R1 + 2R2}{R1}\right\}}$Hz (4.6)

Siklus kerja (Duty cycle) adalah $DC = \frac{t_H}{t_L + t_H}\times 100\% = \frac{Rf.C.\ln\left\{\frac{R1 + 2R2}{R1}\right\}}{2Rf.C.\ln\left\{\frac{R1 + 2R2}{R1}\right\}}\times 100\% = 50\%$

Supaya dalam perancangan (desain) menjadi mudah dan sederhana maka dibuat $\ln\left\{\frac{R1 + 2R2}{R1}\right\}=1$ sehingga perbandingan nilai R1 dan R2 adalah

COPY

$R2 = 0{,}86.R1$ (4.7)

Rumusnya menjadi sederhana.

$t_L = Rf.C$ dan $t_H = Rf.C$ (4.8)

$T = t_L + t_H = 2Rf.C$ (4.9)

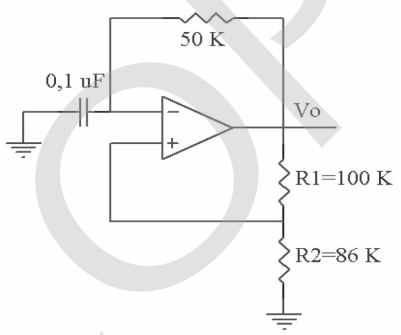
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2Rf.C} \quad (4.10)$$

$$DC = \frac{t_H}{t_L + t_H} \times 100\% = \frac{Rf.C}{2Rf.C} \times 100\% = 50\% \quad (4.11)$$

Contoh 4.1

Berapa frekuensi osilasi rangkaian berikut dan berapa tegangan maks. dan min. pada C?

$\pm$ V = $\pm$ 12 volt ; $\pm$ Vsat = $\pm$ 10 volt.



Penyelesaian: Apakah nilai R2 = 0,86 R1? Ya

$$fo = \frac{1}{2Rf.C} = \frac{1}{2.5.10^{4}.10^{-7}} = \frac{1}{10^{-2}} = 100\text{Hz}$$

$$Vcmaks = V_{UT} = \frac{R2}{R1 + R2}(+Vsat) = \frac{86}{100+86}(10\text{V}) = +4{,}62\text{V}$$

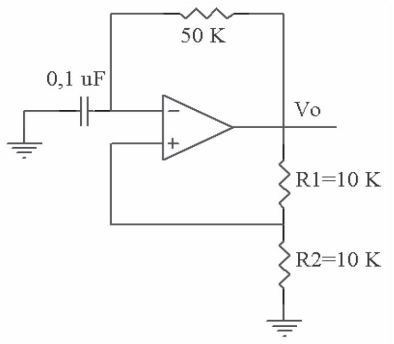
$$Vcmin = V_{LT} = \frac{R2}{R1 + R2}(-Vsat) = \frac{86}{100+86}(-10\text{V}) = -4{,}62\text{V}$$

Contoh 4.2

Berapa frekuensi osilasi rangkaian berikut dan berapa tegangan maks. dan min. pada C?

$\pm$ V = $\pm$ 12 volt ; $\pm$ Vsat = $\pm$ 10 volt.

COPY



Penyelesaian: Apakah nilai R2 = 0,86 R1? Tidak

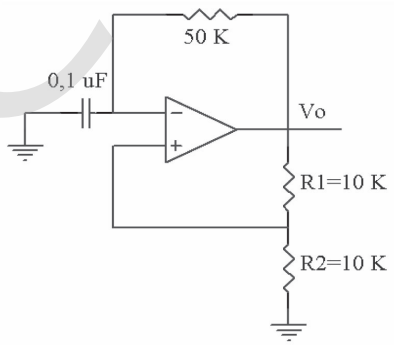
$$fo = \frac{1}{2Rf.C.\ln\left(\frac{R1 + 2R2}{R1}\right)} = \frac{1}{2.5.10^{4}.10^{-7}.\ln\left(\frac{10+20}{10}\right)} = \frac{1}{10^{-2}.\ln(3)} = \frac{100}{1,1} = 90,91\text{Hz}$$

$$Vcmaks = V_{UT} = \frac{R2}{R1 + R2}(+Vsat) = \frac{10}{10+10}(10\text{V}) = +5\text{V}$$

$$Vcmin = V_{LT} = \frac{R2}{R1 + R2}(-Vsat) = \frac{10}{10+10}(-10\text{V}) = -5\text{V}$$

Contoh 4.3

Diketahui rangkaian astable *multivibrator* dan untuk Op-ampnya ± V = ± 12 volt; ± Vsat = ± 10 volt. Gambarkan dengan teliti bentuk gelombang *output* (Vo) dan Vc pada satu sumbu salib apabila pada saat t = 0, tegangan Vo = +Vsat dan Vc = -2 V!



Penyelesaian: Apakah nilai R2 = 0,86 R1? Tidak

$$fo = \frac{1}{2Rf.C.\ln\left(\frac{R1 + 2R2}{R1}\right)} = \frac{1}{2.5.10^{4}.10^{-7}.\ln\left(\frac{10+20}{10}\right)} = \frac{1}{10^{-2}.\ln(3)} = \frac{100}{1,1} = 90,91\text{Hz}$$

$$t_L = Rf.C.\ln\left(\frac{R1 + 2R2}{R1}\right) = 5.10^{4}.10^{-7}.\ln(3) = 5,5\text{m det}$$

COPY

$$t_H = Rf.C.\ln\left(\frac{R1 + 2R2}{R1}\right) = 5.10^4.10^{-7}.\ln(3) = 5{,}5\text{m det}$$

$$Vcmaks = V_{UT} = \frac{R2}{R1 + R2}(+Vsat) = \frac{10}{10+10}(10\text{V}) = +5\text{V}$$

$$Vcmin = V_{LT} = \frac{R2}{R1 + R2}(-Vsat) = \frac{10}{10+10}(-10\text{V}) = -5\text{V}$$

Untuk mencari t1, persamaannya adalah

$$Vc = A.e^{-\frac{t}{\tau}} + V(\sim) = \{V(\sim) - V(0)\}\{1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\} + V(0)$$

$V(0)$ = -2volt

$V(\sim)$ = + Vsat = +10volt

$$Vc = \{10 - (-2)\}\{1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\} + (-2)$$

$$Vc = \{12\}\{1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\} + (-2)$$

Pada saat t = t1 nilai $Vc = V_{UT} = \frac{R2}{R1 + R2}(+Vsat) = +5\text{volt}$

$$5 = \{12\}\{1 - e^{-\frac{t1}{\tau}}\}$$

$$5 + 2 = 12 - 12\{e^{-\frac{t1}{\tau}}\}$$

$$-5 = 12.e^{-\frac{t1}{\tau}}$$

$\left\{\frac{5}{12}\right\} = e^{-\frac{t1}{\tau}}$ dilogaritmakan dengan ln menjadi $\ln\left\{\frac{5}{12}\right\} = -\frac{t1}{\tau}$

$t1 = \tau\ln\left\{\frac{12}{5}\right\}$ dimana τ adalah konstanta waktu (*time constant*) sebesar $\tau = Rf.C$

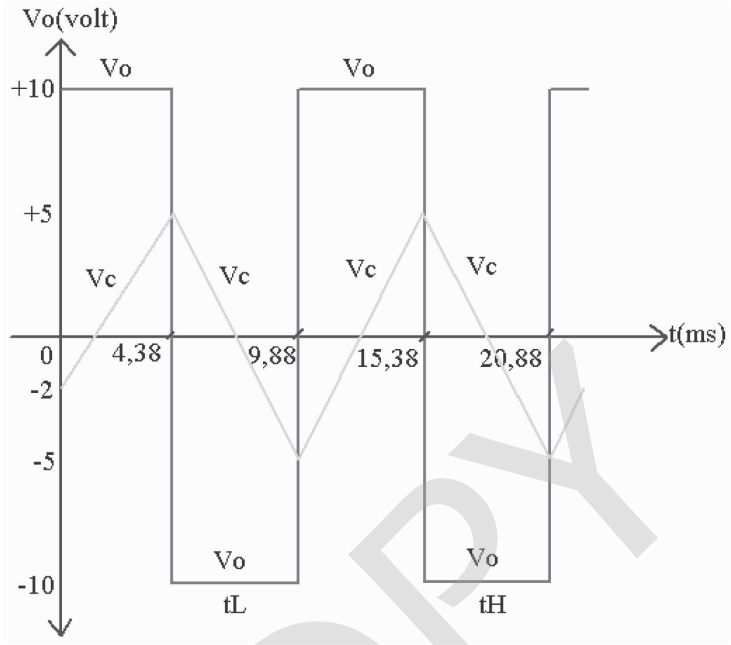
$t1 = Rf.C.\ln\{2{,}4\} = 5.10^4.10^{-7}.(0{,}875) = 4{,}38\text{mdet}$

$t2 = t1 + t_L = 4{,}38 + 5{,}5 = 9{,}88$ mdet

$t3 = t2 + t_H = 9{,}88 + 5{,}5 = 15{,}38$ mdet

COPY

Bentuk gelombang tegangan output:

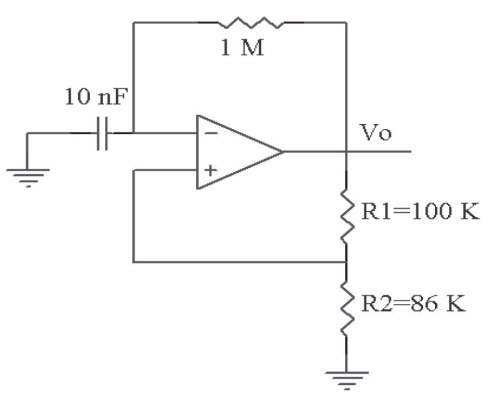


Contoh 4.4

Rancanglah rangkaian *astable multivibrator* dengan *duty cycle* sama dengan 50 % dengan amplitude ± 10 volt dan frekuensi osilasi 50 Hz!

Penyelesaian:

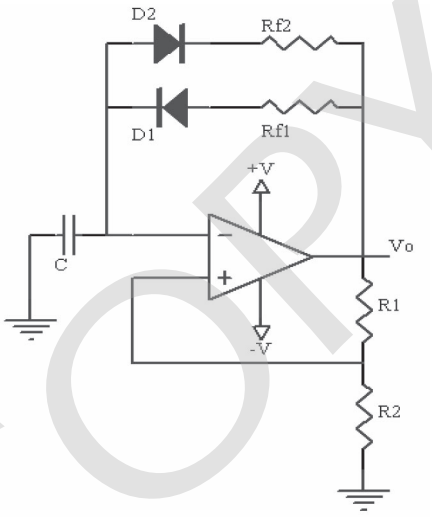
Dipilih Op-amp dengan: ± V = ± 12 volt dan ± Vsat = ± 10 volt
Dipilih nilai R2 = 0,86.R1 supaya rumusnya mudah. Dipilih R1 = 100 K dan R2 = 86 K.
Dipih C = 10 nF.
Dihitung Rf dengan rumus $fo = \frac{1}{2.Rf.C}$ atau $Rf = \frac{1}{2.fo.C} = \frac{1}{2.50.10^{-8}} = 1\text{M}\Omega$



COPY

4.1.1 *Astable Multivibrator* dengan *Duty Cycle* Tidak Sama dengan 50%

Apabila resistor umpan balik Rf ditambah menjadi dua yaitu Rf1 dan Rf2 di mana Rf1 diseri dengan dioda D1 yang arahnya ke kiri dan Rf2 diseri dengan dioda D2 yang arahnya ke kanan. Kedua gabungan komponen tersebut diparalel dan dihubungkan antara tegangan *output* Vo dan masukan (-) pada Op-amp. Rangkaiannya seperti pada Gambar 4.3 sehingga pada saat kapasitor membuang muatan (*discharge*) yang dilalui arus adalah Rf2 (bukan Rf1) karena dioda D2 dalam arah maju (*forward bias*), sedangkan D1 dalam arah balik (*reverse bias*). Oleh karena itu, konstanta waktu (*time constant*) adalah τ = Rf2.C. Sedangkan apabila kapasitor diisi muatan (*charge*) yang dilalui arus adalah Rf1 (bukan Rf2) karena dioda D1 dalam arah maju (*forward bias*), sedangkan D2 dalam arah balik (*reverse bias*). Oleh karena itu, konstanta waktu (*time constant*) adalah τ = Rf1.C.



Gambar 4.3 *Rangkaian astable multivibrator apabila duty cycle tidak sama dengan 50 %*

Rumus-rumus pada astable multivibrator yang sudah dihitung juga masih berlaku yaitu:

Waktu rendah $tL = Rf2.C.ln\left\{\frac{R1 + 2R2}{R1}\right\}$ atau $\tau = Rf2.C$ karena (4.12)

Waktu tinggi $t_H = Rf1.C.ln\left\{\frac{R1 + 2R2}{R1}\right\}$ atau $\tau = Rf1.C$ karena (4.13)

Periode = T adalah $T = t_L + t_H = (Rf1.C + Rf2.C)ln\left\{\frac{R1 + 2R2}{R1}\right\}$ detik (4.14)

Frekuensi osilasi adalah $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{(Rf1.C + Rf2.C)ln\left\{\frac{R1 + 2R2}{R1}\right\}}$ Hz (4.15)

COPY

Duty cycle-nya adalah $DC = \dfrac{Rf1.C.\ln\left\{\dfrac{R1 + 2R2}{R1}\right\}}{(Rf1.C + Rf2.C)\ln\left\{\dfrac{R1 + 2R2}{R1}\right\}} \times 100\%$

$$DC = \frac{Rf1}{Rf1 + Rf2} \times 100\% \qquad (4.16)$$

Apabila Rf1 = Rf2 maka DC = 50%.

Apabila Rf1 > Rf2 maka DC > 50%.

Apabila Rf1 < Rf2 maka DC < 50%.

Supaya dalam perancangan (desain) menjadi mudah dan sederhana maka dibuat $\ln\left\{\dfrac{R1+2R2}{R1}\right\} = 1$. Karena itu, perbandingan nilai R1 dan R2 adalah dan rumusnya menjadi sederhana.

$$t_L = Rf2.C \text{ dan } t_H = Rf1.C \qquad (4.17)$$

$$T = t_L + t_H = (Rf1 + Rf2).C \qquad (4.18)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{(Rf1 + Rf2).C} \qquad (4.19)$$

$$DC = \frac{t_H}{t_L + t_H} \times 100\% = \frac{Rf1.C}{(Rf1 + Rf2).C} \times 100\% = \frac{Rf1}{Rf1 + Rf2} \times 100\% \qquad (4.20)$$

Apabila Rf1 = Rf2 maka DC = 50%

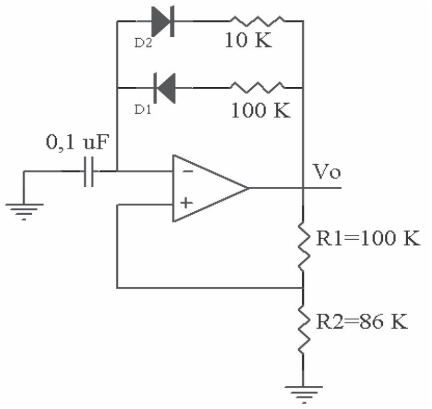
Apabila Rf1 > Rf2 maka DC > 50%

Apabila Rf1 < Rf2 maka DC < 50%

Contoh 4.5

Berapa frekuensi osilasi rangkaian berikut dan berapa duty cycle (DC)?

± V = ± 12 volt ; ± Vsat = ±10 volt.



COPY

Penyelesaian: Apakah nilai R2 = 0,86 R1? Ya

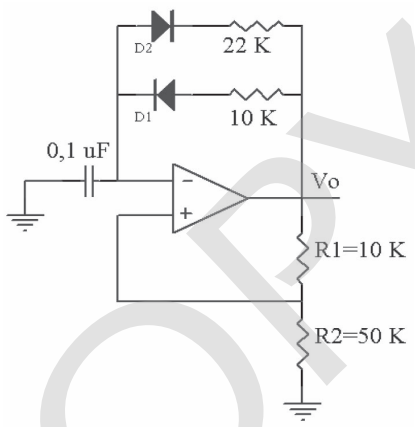
$$fo = \frac{1}{(Rf1+Rf2).C} = \frac{1}{(1+10).10^{4}.10^{-7}} = \frac{1}{(11).10^{-3}} = \frac{1000}{11} = 90{,}91\text{Hz}$$

$$DC = \frac{Rf1}{Rf1+Rf2}.100\% = \frac{100}{100+10}.100\% = 90{,}91\%$$

Contoh 4.6

Berapa frekuensi osilasi rangkaian berikut dan duty cycle (DC)?

± V = ± 12 volt ; ± Vsat = ± 10 volt.



Penyelesaian: Apakah nilai R2 = 0,86 R1? Tidak

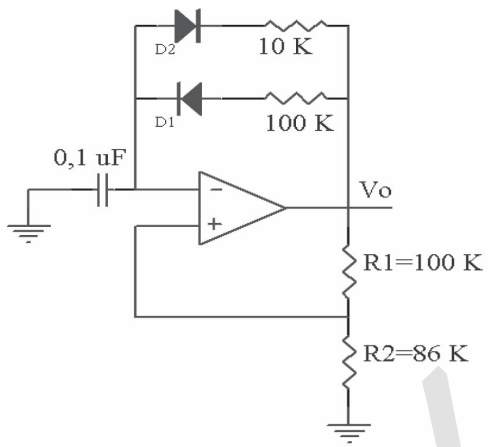
$$fo = \frac{1}{(Rf1+Rf2).C.\ln\left(\frac{R1 + 2R2}{R1}\right)} = \frac{1}{(2{,}2+1).10^{4}.10^{-7}.\ln\left(\frac{10+100}{10}\right)} = \frac{1000}{(3{,}2).\ln(11)} = 130{,}21\text{Hz}$$

$$DC = \frac{Rf1}{Rf1+Rf2}.100\% = \frac{10K}{10K+22K}.100\% = 31{,}25\%$$

Contoh 4.7

Diketahui rangkaian *astable multivibrator* dan untuk Op-ampnya ± V = ± 12 volt; ± Vsat = ± 10 volt. Gambarkan dengan teliti bentuk gelombang *output* (Vo) dan Vc pada satu sumbu salib apabila pada saat t = 0, tegangan Vo = -Vsat, dan Vc = -1 V!

COPY



Penyelesaian: Apakah nilai R2 = 0,86 R1? Ya

$$fo = \frac{1}{(Rf1+Rf2).C} = \frac{1}{(1+10).10^{4}.10^{-7}} = \frac{1}{(11).10^{-3}} = \frac{1000}{11} = 90{,}91\text{Hz}$$

$$DC = \frac{Rf1}{Rf1+Rf2}.100\% = \frac{100}{100+10}.100\% = 90{,}91\%$$

$$T = \frac{1}{fo} = \frac{1}{90{,}91} = 11\text{m det}$$

$$t_L = Rf2.C = 10^{4}.10^{-7} = 1\text{m det}$$

$$t_H = Rf1.C = 10^{5}.10^{-7} = 10\text{m det}$$

$$Vcmaks = V_{UT} = \frac{R2}{R1 + R2}(+Vsat) = \frac{86}{86+100}(10\text{V}) = +4{,}62\text{V}$$

$$Vcmin = V_{LT} = \frac{R2}{R1 + R2}(-Vsat) = \frac{86}{86+100}(-10\text{V}) = -4{,}62\text{V}$$

Untuk mencari t1, persamaannya adalah $Vc = A.e^{-\frac{t}{\tau}} + V(\sim) = \{V(0)-V(\sim)\}.e^{-\frac{t}{\tau}} + V(\sim)$

$V(0) = -1Volt$

$V(\sim) = -Vsat = -10Volt$

$$Vc = \{-1-(-10)\}.e^{-\frac{t}{\tau}}+(-10)$$

$$Vc = \{9\}.e^{-\frac{t}{\tau}}+(-10)$$

Pada saat t = t1 nilai $Vc = V_{LT} = \frac{R2}{R1 + R2}(-Vsat) = -4{,}62\text{volt}$

COPY

$-4{,}62 = (9).e^{-\frac{t1}{\tau}}(-9)$

$\left\{\frac{5{,}38}{9}\right\} = e^{-\frac{t1}{\tau}}$ dilogaritmakan dengan ln.

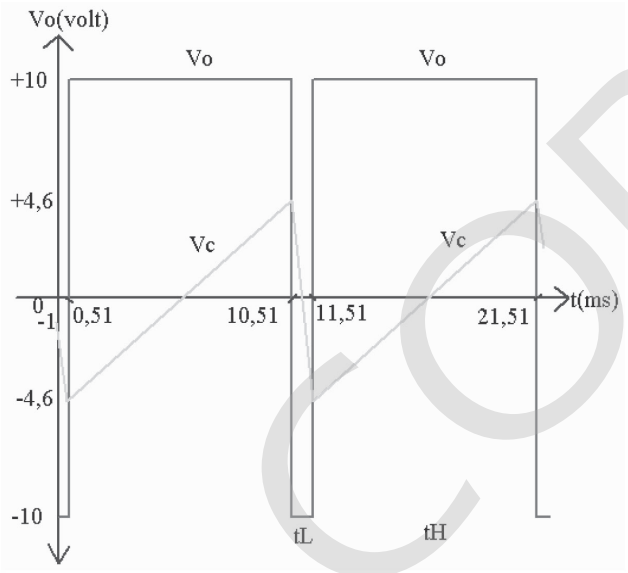
$\ln\left\{\frac{5{,}38}{9}\right\} = -\frac{t1}{\tau}$

$t1 = \tau \ln\left\{\frac{9}{5{,}38}\right\}$ dimana τ adalah konstanta waktu (*time constant*) sebesar $\tau = Rf2.C$

$t1 = Rf2.C.\text{in}\{1{,}67\} = 10^4.10^{-7}.(0{,}51) = 0{,}51\text{m det}$

$t2 = t1 + t_H = 0{,}51 + 10 = 10{,}51\text{m det}$

$t3 = t2 + t_L = 10{,}51 + 1 = 11{,}51\text{m det}$



Contoh 4.8

Rancanglah rangkaian *astable multivibrator* dengan *duty cycle* sama dengan 40 % dengan amplitude ± 10 volt dan frekuensi osilasi 50 Hz!

Penyelesaian:

Periode sinyal adalah $T = \frac{1}{fo} = \frac{1}{50} =$ 20m detik

Waktu positif (tH) t_H = 40%.(20) = 8m detik

Waktu negatif (tL) $t_L = (100\% - 40\%).(20) =$ 12m detik

Dipilih Op-amp dengan: ± V = ± 12 volt dan ± Vsat = ± 10 volt

Dipilih nilai R2 = 0,86.R1 supaya rumusnya mudah. Dipilih R1 = 100 K dan R2 = 86 K.

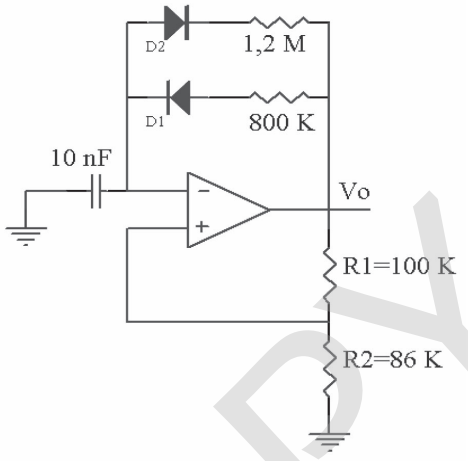
Dipilih D1 dan D2 yang tegangan drop-nya mendekati nol.

Dipilih C = 10 nF.

COPY

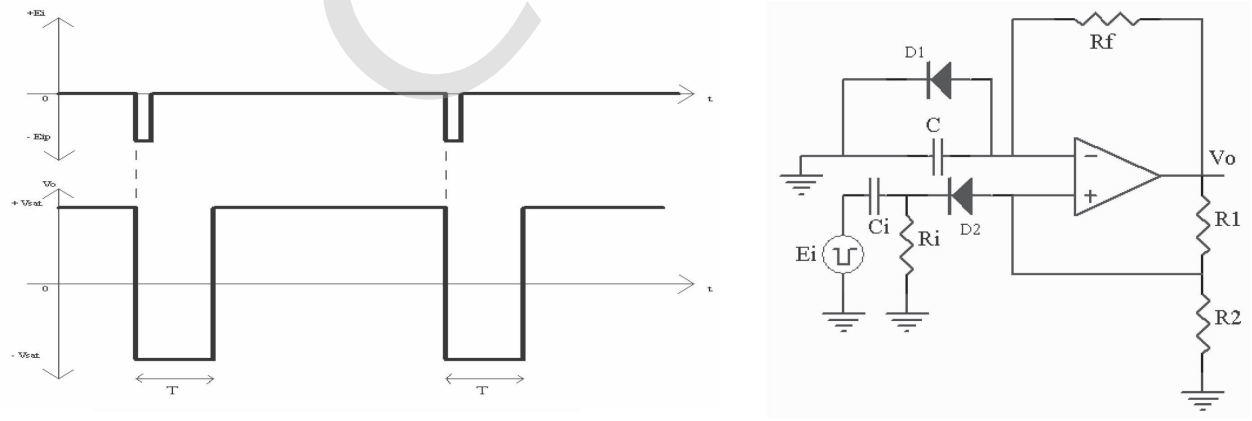
Dihitung Rf1 dengan rumus $t_H = Rf1.C$ atau $Rf1 = \frac{t_H}{C} = \frac{8.10^{-3}}{10^{-8}} = 800K\Omega$

Dihitung Rf2 dengan rumus $t_L = Rf2.C$ atau $Rf2 = \frac{t_L}{C} = \frac{12.10^{-3}}{10^{-8}} = 1{,}2M\Omega$



4.2 Multivibrator Satu Tembakan (One Shot Multivibrator)

Rangkaian multivibrator satu tembakan dinamakan juga sebagai *multivibrator mono stable* yaitu rangkaian yang mempunyai satu keadaan stabil. Rangkaian ini ada yang trigger positif atau trigger negatif. Untuk trigger negatif maka keadaan stabilnya di +Vsat, sedangkan untuk trigger positif stabilnya –Vsat. Hubungan sinyal trigger negatif dengan sinyal keluaran dari *one-shot multivibrator*.



Gambar 4.4 *Rangkaian mono stable multivibrator dengan trigger negatif*

COPY

Rangkaian *mono stable (one shot) multivibrator* mempunyai tiga keadaan yaitu

(1) Keadaan stabil, pada keadaan ini dan tegangan yang masuk pada masukan (+) Op-amp adalah $V_{UT} = \frac{R2}{R1+R2}(+Vsat)$. Tegangan *output* Vo = +Vsat melalui Rf dan dioda D1 bias maju (forward) sehingga timbul arus yang melewati Rf arahnya ke kiri dan mengisi kapasitor (charge) sehingga tegangannya naik. Tegangan kapasitor (Vc) menjadi sama dengan tegangan drop pada dioda (Vb) dan tegangan ini masuk pada masukan (-) Op-amp sehingga Ed sama dengan *Ed = masukan* (+) *– masukan* (–) = $V_{UT} - Vb$. Selama nilai $V_{UT} > Vb$ maka Ed = positif sehingga tegangan *output* Vo sama dengan +Vsat.

(2) Keadaan peralihan yaitu keadaan menuju penentuan waktu. Apabila tegangan input Ei ditarik dari nol menuju negatif yaitu $Ei = 2.V_{UT}$ maka dioda D2 menjadi bias maju (*forward bias*) dan masukan (–) Op-amp ditarik ke negatif sehingga *Ed = negatif* dan *Vo = –Vsat*. Tegangan yang masuk ke masukan (+) Op-amp menjadi $V_{LT} = \frac{R2}{R1+R2}(-Vsat)$ dan kapasitor C menjadi membuang muatannya (*discharge*) melewati Rf. Selama nilai $V_{LT} < Vc$ maka nilai *Ed = negatip* dan *Vo = –Vsat*. Karena nilai Vc turun terus maka suatu saat $Vc < V_{LT}$ maka Ed berubah menjadi positif dan Vo menjadi +Vsat. Selang waktu tegangan Vc dari sama dengan tegangan Vb sampai sama dengan dinamakan lebar pulsa keluaran atau T.

(3) Penentuan waktu lebar pulsa keluaran (T). Untuk menghitung T digunakan persamaan Vc(t).

$$Vc(t) = A.e^{-\frac{t}{\tau}} + V(\sim) = \{V(0) - V(\sim)\}.e^{-\frac{t}{\tau}} + V(\sim) \qquad (4.21)$$

Di mana $V(0) = Vb = V_\partial$

$V(\sim) = -Vsat$

$$Vc(t) = \{V_\partial - (-Vsat)\}.e^{-\frac{t}{\tau}} + (-Vsat)$$

$$Vc(t) = \{V_\partial + Vsat\}.e^{-\frac{t}{\tau}} - Vsat$$

Pada saat t = T nilai $Vc(t) = V_{LT} = \frac{R2}{R1+R2}(-Vsat)$

$$\frac{R2}{R1+R2}(-Vsat) = \{V_\partial + Vsat\}.e^{-\frac{T}{\tau}} - \frac{R1+R2}{R1+R2}(Vsat)$$

$e^{-\frac{T}{\tau}} = \frac{R1.Vsat}{(R1+R2)(V_\partial + Vsat)}$ dilogaritmakan dengan ln

$$-\frac{T}{\tau} = \ln\left\{\frac{R1.Vsat}{(R1+R2)(V_\partial + Vsat)}\right\}$$

$$T = \tau \ln\left\{\frac{(R1+R2)(V_\partial + Vsat)}{R1.Vsat}\right\}$$ di mana τ adalah konstanta waktu (*time constant*) sebesar $\tau = Rf.C$ (4.22)

$$T = Rf.C.\ln\left\{\frac{(R1+R2)(V_\partial + Vsat)}{R1.Vsat}\right\} \qquad (4.23)$$

Apabila nilai $V_\partial << Vsat$ maka $T = Rf.C.\ln\left\{\frac{(R1+R2)}{R1}\right\}$ (4.24)

COPY

(4) Waktu pemulihan (*recovery time*). Waktu pemulihan adalah waktu yang diperlukan oleh gelombang Vc mulai dari V_{LT} sampai dengan Vb (tegangan maju pada dioda) sehingga rangkaian ini siap untuk dipicu (*trigger*) lagi. Waktu pemulihan (*recovery time*) disingkat t_r. Untuk menghitungnya digunakan persamaan

$$Vc = \{V(\sim) - V(0)\}\{1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\} + V(0)$$

$$V(0) = V_{LT} = \frac{R2}{R1+R2}(-Vsat)$$

$$V(\sim) = +Vsat$$

$$Vc = \left\{(+Vsat) - \frac{R2}{R1+R2}(-Vsat)\right\}\left\{1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right\} + \frac{R2}{R1+R2}(-Vsat)$$

$$Vc = \left\{\frac{(R1+R2)+R2}{R1+R2}(+Vsat)\right\}\left\{1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right\} + \frac{R2}{R1+R2}(-Vsat)$$

Pada saat $t = t_r$ nilai $V_c = V_b$

$$Vb = \left\{\frac{(R1+R2)+R2}{R1+R2}(+Vsat)\right\}\left\{1 - e^{-\frac{t_r}{\tau}}\right\} + \frac{R2}{R1+R2}(-Vsat)$$

$$Vb(R1+R2)/Vsat = \{R1+2R2\}\left\{1 - e^{-\frac{t_r}{\tau}}\right\} - R2$$

$$\frac{Vb(R1+R2)}{Vsat} = \{R1+2R2\} - \{R1+2R2\}.e^{-\frac{t_r}{\tau}} - R2$$

$$-(R1+R2) + \frac{(R1+R2)Vb}{Vsat} = -\{R1+2R2\}.e^{-\frac{t_r}{\tau}}$$

$$-\frac{(R1+R2)Vsat}{Vsat} + \frac{(R1+R2)Vb}{Vsat} = -\{R1+2R2\}.e^{-\frac{t_r}{\tau}}$$

$$\frac{(R1+R2)(Vsat-Vb)}{Vsat} = (R1+2R2).e^{-\frac{t_r}{\tau}}$$

$$\frac{(R1+R2)(Vsat-Vb)}{Vsat.(R1+2R2)} = e^{-\frac{t_r}{\tau}}$$ dilogaritmakan dengan ln,

$$\ln\frac{(R1+R2)(Vsat-Vb)}{Vsat.(R1+2R2)} = -\frac{t_r}{\tau}$$

$$t_r = \tau\ln\left\{\frac{(R1+2R2).Vsat}{(R1+R2)(Vsat-Vb)}\right\}$$ di mana τ adalah konstanta waktu sebesar $\tau = Rf.C$

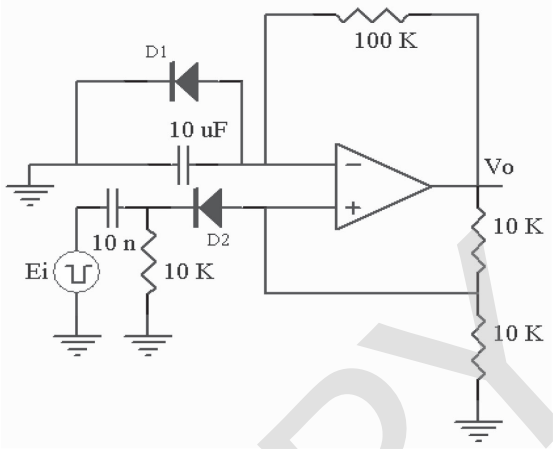
$$t_r = Rf.C.\ln\left\{\frac{(R1+2R2).Vsat}{(R1+R2)(Vsat-Vb)}\right\} \qquad (4.25)$$

COPY

Contoh 4.9

Berapa lebar pulsa tegangan *output* (T) dan waktu pemulihan (tr)?

± V = ± 12 volt ; ± Vsat = ± 10 volt.



Apabila $V_\partial << Vsat$ maka $T = Rf.C.ln\left\{\frac{R1+R2}{R1}\right\}$

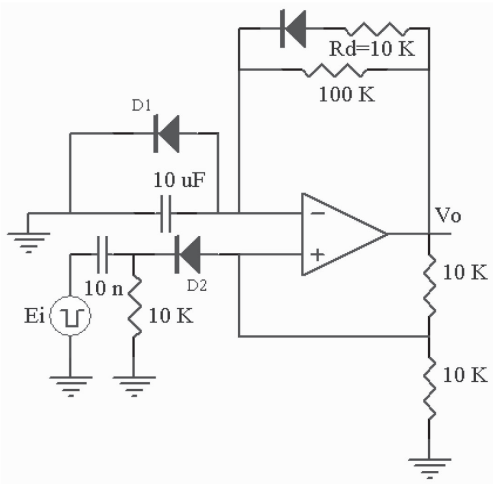
$$T = Rf.C.ln\left\{\frac{(R1+R2)}{R1}\right\} = 10^5.10^{-5}.\ln\left\{\frac{10+10}{10}\right\} = 0{,}693 \text{ det}$$

$$t_r = Rf.C.ln\left\{\frac{(R1+2R2).Vsat}{(R1+R2).(Vsat-Vb)}\right\} = 10^5.10^{-5}.\ln\left\{\frac{(10+20)(10)}{(10+10)(10-1)}\right\} = \ln\frac{30}{18} = 0{,}51 \text{ det}$$

Contoh 4.10

Berapa lebar pulsa tegangan *output* (T) dan waktu pemulihan (tr)?

± V = ± 12 volt ; ± Vsat = ± 10 volt.



COPY

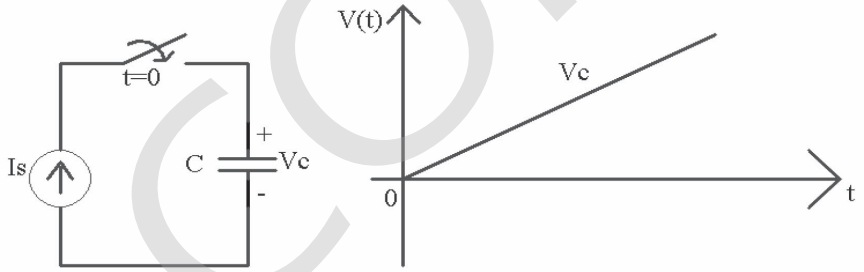
Apabila $V_\partial << Vsat$ maka $T = Rf.C.ln\left\{\frac{R1+R2}{R1}\right\}$

$$T = Rf.C.ln\left\{\frac{(R1+R2)}{R1}\right\} = 10^5.10^{-5}.\ln\left\{\frac{10+10}{10}\right\} = 0{,}693 \text{ det}$$

Untuk mempercepat waktu pemulihan (*recovery time*) maka dipasang Rd seri dengan dioda yang diparalel dengan Rf. Apabila kapasitor membuang muatan (*discharge*) maka arus akan lewat Rf karena diodanya reverse bias. Sedangkan jika kapasitor diisi muatan (*charge*) yaitu sampai sama dengan V_∂ dan waktunya sama dengan t_r maka diodanya pada mode *forward bias* sehingga Rtotal adalah Rd paralel Rf dan nilainya menjadi kecil sehingga arus besar dan waktu pemulihannya cepat. Apabila Rd sepersepuluh dari Rf maka $t_r = \frac{1}{10}.T$. Dari data didapatkan $t_r = \frac{1}{10}.T = \frac{1}{10}.(0{,}693) = 0{,}0693$ det .

4.3 Pembangkit Gelombang Tanjakan (Ramp Generator)

Rangkaian pembangkit tanjakan atau *ramp generator* pada prinsipnya menggunakan proses pengisian muatan (*charge*) pada kapasitor dan pembuangan muatan (*discharge*). Pada saat pengisian muatan (*charge*) maka tegangan pada kapasitor naik, sedangkan pada saat membuang muatan (*discharge*) maka tegangan pada kapasitor turun seperti pada gambar berikut.



Gambar 4.5 *Rangkaian gelombang tanjakan (Ramp generator) dengan kapasitor*

Rumus yang digunakan adalah bahwa muatan merupakan arus kali waktu seperti berikut.

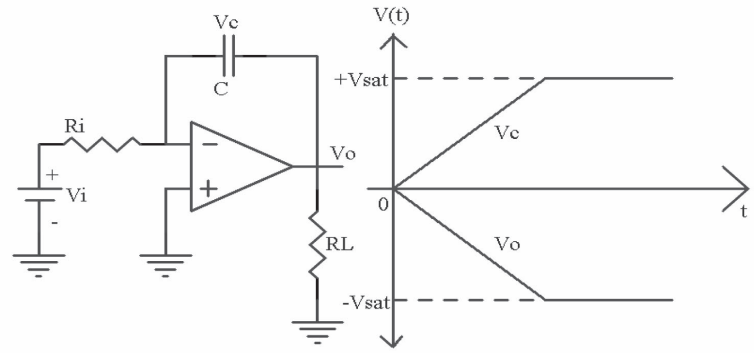
$$Q = I.t \tag{4.26}$$

$$C = \frac{Q}{V} \tag{4.27}$$

$$V_C = \frac{Q}{V} = \frac{I.t}{C} = \frac{Is}{C}.t \tag{4.28}$$

Apabila proses pengisian dan pembuangan muatan pada kapasitor digabung dengan op-amp di mana kapasitor sebagai umpan balik dan sumber arusnya diganti dengan sumber tegangan yang seri dengan tahanan. Rangkaian ini dinamakan juga sebagai rangkaian integrator.

COPY



Gambar 4.6 *Rangkaian gelombang tanjakan dengan Op-amp dan gelombang Vo dan Vc*

$$\text{Apabila } I = \frac{Vi}{Ri} \text{ maka } Vc = \frac{Vi}{Ri.C}.t \text{ dan } Vo = -Vc = -\frac{Vi}{Ri.C}.t \qquad (4.29)$$

Karena rangkaiannya menggunakan op-amp maka tegangan *output*-nya ada batas maksimum yaitu Vo menjadi +Vsat dan ada tegangan *output* batas minimumnya yaitu pada Vo sama dengan –Vsat.

Contoh 4.11

Diketahui op-amp dengan data ± V = ± 12 volt; ± Vsat = ± 10 volt. Hitunglah waktu yang dicapai supaya tegangannya dari 0 volt sampai saturasinya jika R = 10 K dan C = 1uF!

Penyelesaian:

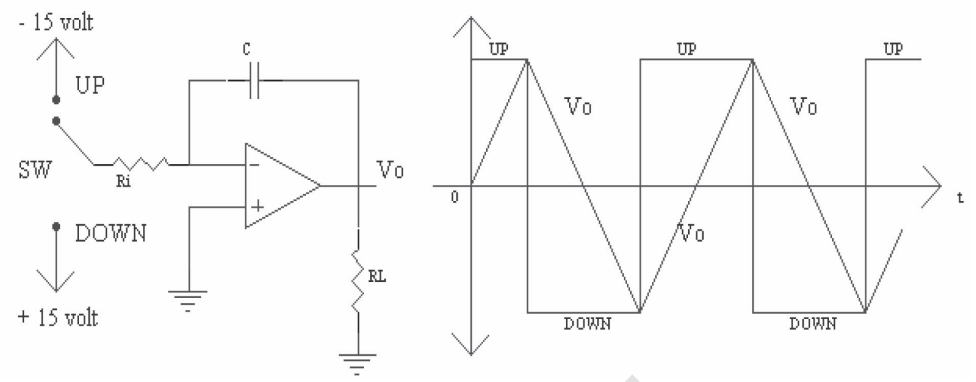
Supaya tegangan output (Vo) menanjak naik maka tegangan input-nya (Vi) sama dengan negatif. Apabila Vi sama dengan -1 volt maka $Vo = -\frac{Vi}{Ri.C}.t$.

$$+10 = -\frac{-1}{10^4.10^{-6}}.t \text{ atau } t = 0{,}1 \text{ detik} = 100\text{m det}$$

4.4 Pembangkit Gelombang Segitiga (*Triangle Wave Generator*)

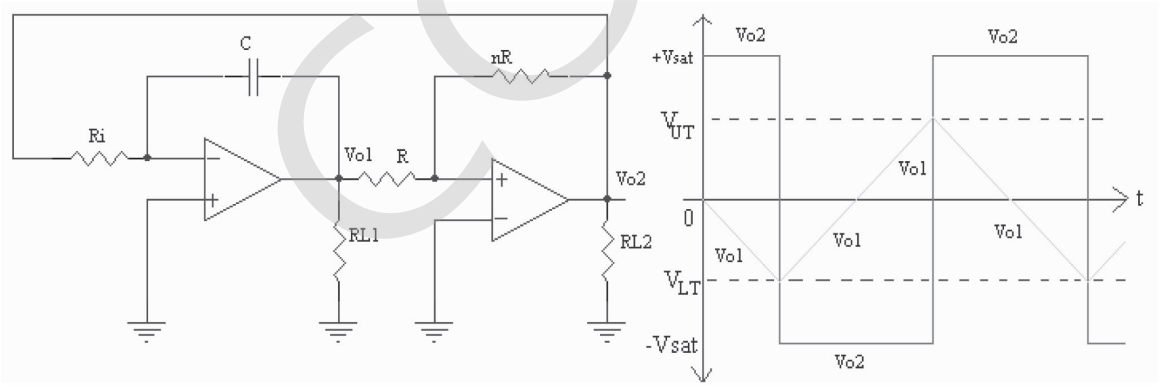
Tegangan *output* (Vo) dari rangkaian pembangkit tanjakan (*ramp generator*) apabila pada bagian *input*-nya dikendalikan sehingga tegangan *output*-nya naik, kemudian turun, kemudian naik lagi dan turun lagi dan seterusnya maka tegangan *output*-nya akan membentuk gelombang yang membentuk segitiga sehingga dinamakan rangkaian pembangkit gelombang segitiga (*triangle wave generator*). Gambar rangkaian pengontrol dan bentuk tegangan keluarannya di mana pada saat saklar (SW) diarahkan ke atas maka terhubung dengan sumber tegangan – 15 volt sehingga Vo naik dan Vo dideteksi dengan voltmeter. Apabila nilai Vo sama dengan yang dinginkan yaitu tegangan puncak segitiga atau sama dengan V_{UT}, kemudian saklar (SW) dipindahkan ke bawah atau terhubung dengan sumber tegangan positif (+ 15 volt) maka tegangan *output*-nya (Vo) menjadi menurun dan apabila Vo sama dengan minimumnya atau sama dengan V_{LT}, kemudian saklar (SW) dipindah lagi ke atas maka Vo naik lagi dan seterusnya maka tegangan *output* (Vo) membentuk gelombang segitiga seperti Gambar 4.7.

COPY



Gambar 4.7 *Rangkaian pembangkit gelombang segitiga dengan saklar*

Untuk menghasilkan gelombang segitiga yang bersifat otomatis untuk menggantikan perubahan saklar yang bekerja secara manual maka diganti dengan rangkaian komparator yang dihubungkan dengan rangkaian ramp generator. Tegangan *output* dari komparator yang menghasilkan tegangan gelombang persegi (*square wave*) dihubungkan dengan *input* ramp generator sehingga menghasilkan gelombang segitiga (*triangle wave*), sedangkan tegangan *output* dari *ramp generator* dihubungkan dengan *input* pada komparator sehingga rangkaian tersebut saling mengontrol satu sama lain dan bekerja terus menerus. Karena bekerja terus menerus maka dinamakan berosilasi, mempunyai frekuensi osilasi dan kebalikannya yaitu periode gelombang. Rangkaiannya seperti berikut.



Gambar 4.8 *Rangkaian pembangkit gelombang segitiga dan gelombang persegi dari Op-Amp*

Mencari waktu rendah (low time) atau t_L.

Persamaan tegangan output gelombang segitiga (Vo1) adalah $Vo = -\frac{Vi}{Ri.C}.t$ (4.30)

Apabila selama selang waktu rendah yaitu $t = t_L$ persamaannya adalah .

$$V_{UT} - V_{LT} = -\frac{-Vsat}{Ri.C}.t_L$$

$$\text{atau } \frac{+Vsat}{n} - \frac{-Vsat}{n} = \frac{Vsat}{Ri.C}.t_L$$

$$t_L = \frac{2Ri.C}{n} \quad (4.31)$$

Mencari waktu tinggi (*high time*) atau t_H.

Persamaan tegangan *output* gelombang segitiga (Vo1) adalah $Vo = -\frac{Vi}{Ri.C}.t$

Apabila selama selang waktu tinggi ($t = t_H$) persamaannya adalah

$$V_{LT} - V_{UT} = -\frac{+Vsat}{Ri.C}.t_H$$

$$\frac{-Vsat}{n} - \frac{+Vsat}{n} = -\frac{Vsat}{Ri.C}.t_H$$

$$t_H = \frac{2.Ri.C}{n} \quad (4.32)$$

Periode gelombang segitiga adalah $T = T_L + t_H = \frac{4.Ri.C}{n}$ (4.33)

Frekuensi osilasi gelombang adalah $f_o = \frac{n}{4.Ri.C}$ (4.34)

Duty cycle atau siklus kerja sama dengan $DC = \frac{t_H}{t_L + t_H} \times 100\% = 50\%$ (4.35)

Contoh 4.12

Diketahui pada Gambar 4.8 yaitu Ri = 10 K, R = 10 K, n.R = 50 K, Ci = 1 uF dan RL = 10 K, Op-amp dengan data ± V = ± 12 volt ; ± Vsat = ± 10 volt. Hitunglah waktu rendah dan waktu tinggi, periode dan frekuensi osilasi, duty cycle, tegangan output maksimum-minimum!

Penyelesaian:

$$t_L = \frac{2.Ri.C}{n} = \frac{2.10^4.10^{-6}}{5} = \frac{2.10^{-2}}{5} = 4.10^{-3}\text{det} = 4\text{m det}$$

$$t_H = \frac{2.Ri.C}{n} = \frac{2.10^4.10^{-6}}{5} = \frac{2.10^{-2}}{5} = 4.10^{-3}\text{det} = 4\text{m det}$$

$$T = t_L + t_H = 4 + 4 = 8 \text{ m det}$$

$$T = \frac{4.Ri.C}{n} = \frac{4.10^4.10^{-6}}{5} = 8 \text{ m det}$$

$$f_o = \frac{n}{4.Ri.C} = \frac{5}{4.10^4.10^{-6}} = \frac{500}{4} = 125 \text{ Hz}$$

$$DC = \frac{4}{4+4} \times 100\% = 50\%$$

$$\pm Vo - segitiga = \pm \frac{Vsat}{n} = \pm \frac{10}{5} = \pm 2\text{volt}$$

$$\pm Vo - persegi = \pm Vsat = \pm 10\text{volt}$$

COPY

Contoh 4.13

Diketahui rangkaian pembangkit gelombang segitiga dan gelombang persegi dan untuk Op-ampnya ± V = ± 12 volt ; ± Vsat = ± 10 volt. Gambarkan dengan teliti bentuk gelombang *output* segitiga (Vo1) dengan nilai maksimum-minimum ± 4 volt dan tegangan *output* persegi (Vo2) pada satu sumbu salib apabila pada saat t = 0, tegangan Vo1 = + 2 volt dan Vo2 = +Vsat dengan frekuensi osilasi sama dengan 50 Hz dan DC = 50%.

Penyelesaian:

$\pm Vo - segitiga = \pm \frac{Vsat}{n}$ atau $\pm 4 = \pm \frac{10}{n}$ didapatkan n = 2,5

Jika R = 10K maka nilai nR = 25K.

Jika C = 100 nF.

Dengan $f_o = \frac{n}{4.Ri.C}$ atau $50 = \frac{2,5}{4.Ri.10^{-7}}$ atau $Ri = \frac{2,5}{4.Ri.C} = \frac{2,5}{2.10^2.10^{-7}} = 125K\Omega$

Mencari t1 yaitu pada saat Vo1 = -4 volt.

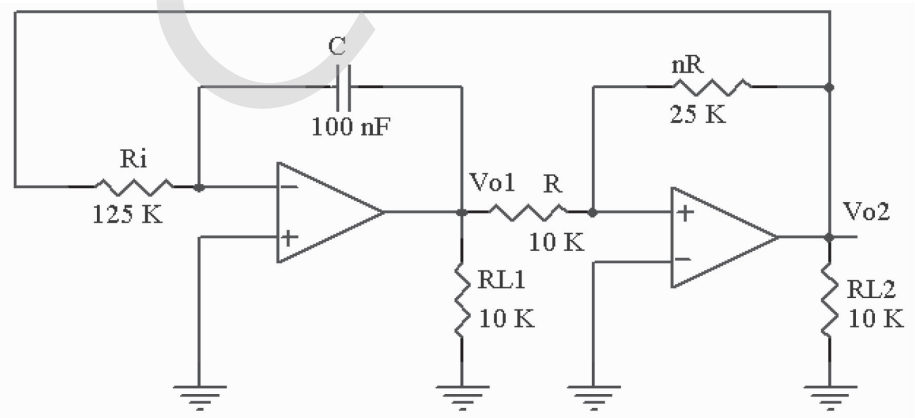
Periode gelombang sama dengan $T = \frac{1}{fo} = \frac{1}{50} = 20$mili det

Persamaan gelombang segitiga: $Vo = -\frac{Vi}{Ri.C}.t$

Pada saat t = 0 diketahui Vi = Vo2 = +Vsat = +10 volt dan Vo1 = +2 volt.

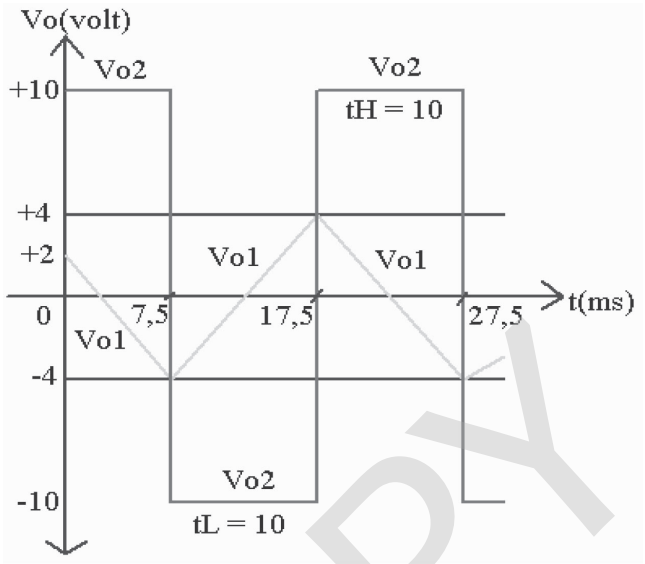
$Vo = -\frac{Vi}{Ri.C}.t$ atau $(-4-(+2)) = -\frac{+10}{125.10^3.10^{-7}}.t1$ atau t1 = 7,5 mili det

Rangkaian hasil perancangan:



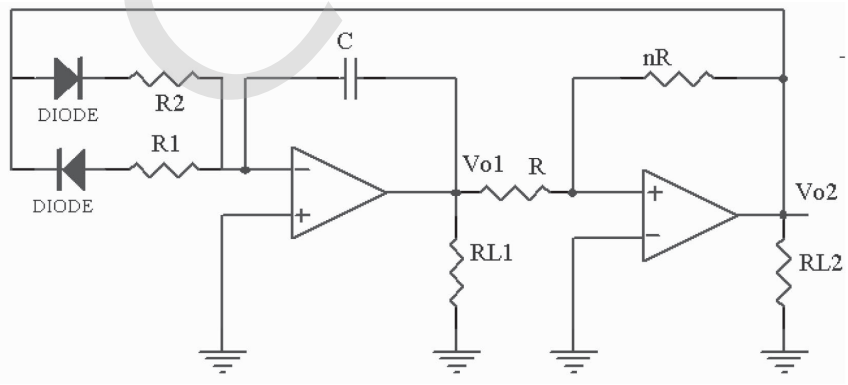
COPY

Bentuk gelombang segitiga (Vo1) dan gelombang persegi (Vo2).



4.5 Pembangkit Gelombang Segitiga dengan *Duty Cycle* Tidak Sama dengan 50%

Untuk membuat rangkaian gelombang segitiga dengan *duty cycle* tidak sama dengan 50% yaitu dengan mengubah nilai waktu tinggi berbeda dengan waktu rendah dengan cara membuat kemiringan (*gradient*) menjadi tidak sama yaitu membuat nilai Ri yang berbeda dan diseri dengan dioda yang arahnya berbeda seperti pada gambar berikut.



Gambar 4.9 *Pembangkit gelombang segitiga dan gelombang persegi*

Mencari waktu rendah (*low time*) atau t_L. Waktu rendah berarti gradiennya positif atau naik sehingga dioda yang aktif adalah yang bawah dan tahanan *input*-nya adalah R1 sehingga selang waktu rendah yaitu $t = t_L$, persamaannya adalah $V_{UT} - V_{LT} = -\frac{Vi}{Ri.C}.t_L$ atau $\frac{+Vsat}{n} - \frac{-Vsat}{n} = \frac{Vsat}{Ri.C}.t_L$.

sehingga $t_L = -\frac{2Ri.C}{n}$. (4.36)

Mencari waktu tinggi (*high time*) atau t_H. Waktu tinggi berarti gradiennya negatif atau turun sehingga dioda yang aktif adalah yang atas dan tahanan *input*-nya adalah R2 sehingga selang waktu tinggi ($t = t_H$), persamaannya adalah $V_{LT} - V_{UT} = -\frac{+Vsat}{Ri.C}.t_H$ atau $\frac{-Vsat}{n} - \frac{+Vsat}{n} = -\frac{Vsat}{Ri.C}.t_H$.

dan $t_H = \frac{2.R2.C}{n}$ (4.37)

Periode gelombang $T = t_L + t_H = \frac{2.(R1+R2).C}{n}$ (4.38)

dan frekuensi osilasinya $f_o = \frac{n}{2.(R1+R2).C}$ (4.39)

Duty cycle atau siklus kerja sama dengan $DC = \frac{t_H}{t_L + t_H} \times 100\% = \frac{R2}{R1+R2} \times 100\%$ (4.40)

Contoh 4.14

Diketahui rangkaian pada Gambar 4.9 dengan R1 = 10 K, R2 = 20 K, R = 10 K, n.R = 50 K, Ci = 1 uF dan RL1 = 10 K, RL2 = 10 K, diodanya ideal dengan tegangan drop sama dengan 0 volt, Op-amp dengan data ± V = ± 12 volt ; ± Vsat = ± 10 volt. Hitunglah waktu rendah dan waktu tinggi, periode dan frekuensi osilasi, *duty cycle*, tegangan *output* maksimum-minimum.

Penyelesaian:

$t_L = \frac{2.Ri.C}{n} = \frac{2.10^4.10^{-6}}{5} = \frac{2.10^{-2}}{5} = 4.10^{-3}\text{det} = 4\text{m det}$

$t_H = \frac{2.Ri.C}{n} = \frac{2.(2.10^4).10^{-6}}{5} = \frac{4.10^{-2}}{5} = 8.10^{-3}\text{det} = 8\text{m det}$

$T = t_L + t_H = 4 + 8 = 12 \text{ m det}$

$T = \frac{2.(R1+R2).C}{n} = \frac{2.(1+2).10^4.10^{-6}}{5} = 12 \text{ m det}$

$f_o = \frac{n}{2.(R1+R2).C} = \frac{5}{2.(1+2).10^4.10^{-6}} = \frac{500}{6} = 83{,}3 \text{ Hz}$

$DC = \frac{R2}{R1+R2} \times 100\% = \frac{20}{10+20} \times 100\% = 66{,}7\%$

$\pm Vo - segitiga = \pm \frac{Vsat}{n} = \pm \frac{10}{5} = \pm 2\text{volt}$

$\pm Vo - persegi = \pm Vsat = \pm 10\text{volt}$

Contoh 4.15

Diketahui rangkaian pembangkit gelombang segitiga dan gelombang persegi dan untuk Op-ampnya ± V = ± 12 volt; ± Vsat = ± 10 volt. Gambarkan dengan teliti bentuk gelombang *output* segitiga (Vo1) dengan

COPY

nilai maksimum-minimum ± 5 volt dan tegangan *output* persegi (Vo2) pada satu sumbu salib apabila pada saat t = 0, tegangan Vo1 = + 2 volt dan Vo2 = -Vsat dengan frekuensi osilasi sama dengan 100 Hz dan DC = 20%.

Penyelesaian:

$\pm Vo - segitiga = \pm \frac{Vsat}{n}$ atau $\pm 5 = \pm \frac{10}{n}$ didapatkan n = 2

Jika R = 10K maka nilai nR = 20K.

Jika C = 100 nF.

Dengan $f_o = \frac{n}{2.(R1+R2).C}$ atau $100 = \frac{2{,}5}{2.(R1+R2).10^{-7}}$

$(R1+R2) = \frac{1}{10^{-5}} = 100K\Omega$

$DC = \frac{R2}{R1+R2} \times 100\%$ atau $20\% = \frac{R2}{R1+R2} \times 100\%$ atau $\frac{R2}{R1+R2} = \frac{1}{5}$ atau R1 = 4.R2

Jika R2 = 20K maka R1 = 80K.

Periode gelombang sama dengan $T = \frac{1}{fo} = \frac{1}{100}$ = 10 mili det

$DC = \frac{t_H}{T} \times 100\%$ atau $20\% = \frac{t_H}{10} \times 100\%$ didapatkan t_H = 2mili det dan t_L = 8mili det

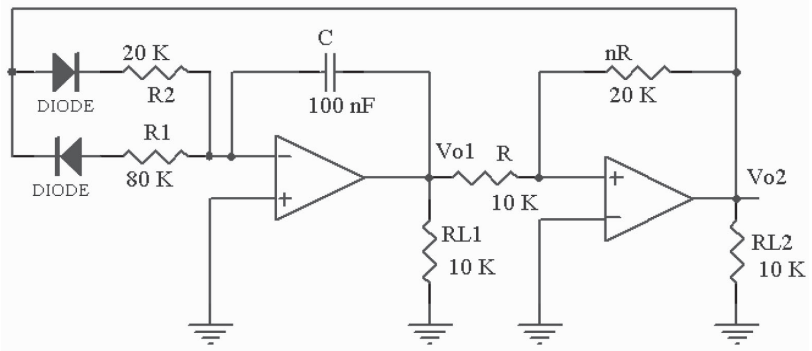
mencari t1 yaitu pada saat Vo1 = 5 volt.

Persamaan gelombang segitiga: $Vo = -\frac{Vi}{Ri.C}.t$

Pada saat t = 0 diketahui Vi = Vo2 = –Vsat = –10 volt dan Vo1 = + 2 volt.

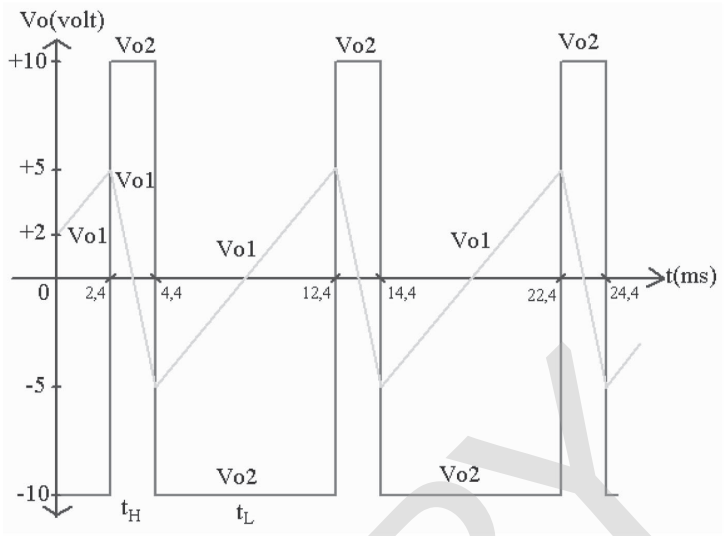
$Vo = -\frac{Vi}{Ri.C}.t$ atau $(5-(+2)) = -\frac{-10}{8.10^4.10^{-7}}.t1$ atau $t1$ = 2,4 mili det

Rangkaian hasil perancangan:



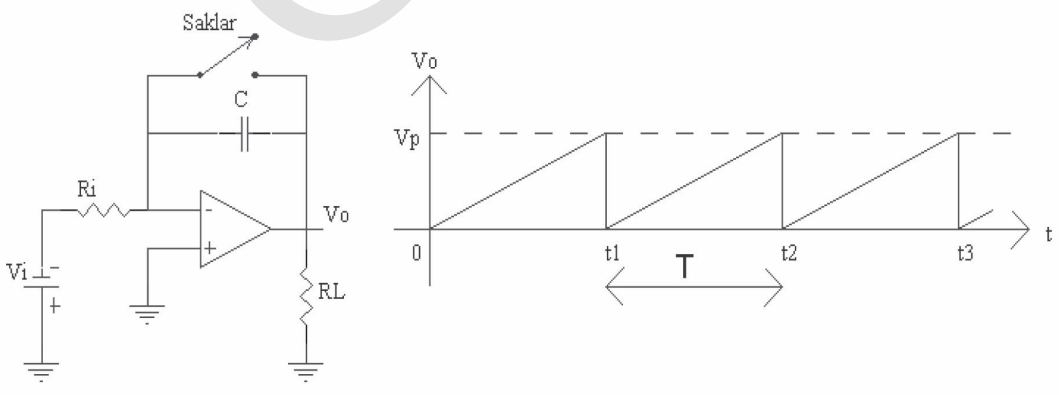
COPY

Bentuk gelombang segitiga (Vo1) dan gelombang persegi (Vo2).



4.6 Pembangkit Gelombang Gigi-Gergaji (*Saw Thoot Wave Generator*)

Penggunaan dari rangkaian pembangkit tanjakan (*ramp generator*) adalah sebagai pembangkit gelombang gigi gergaji. Apabila pada bagian *input*-nya adalah sumber tegangan dan pada kapasitor diparalel dengan saklar (SW) maka dapat dihasilkan gelombang gigi gergaji secara manual. Pada saat rangkaian diaktifkan maka pada *output*, tegangan *output*-nya naik karena gradiennya positif. Pada saat tegangan output sama dengan tegangan yang diinginkan (tegangan *output* puncak atau Vp) saklar ditutup sehingga tegangan *output* menjadi nol, setelah tegangan *output* sama dengan nol, saklar dibuka sehingga tegangan *output* naik lagi dan pada saat Vo maksimum (Vp) saklar ditutup lagi, Vo menjadi nol dan saklar dibuka lagi dan Vo naik lagi dan seterusnya.



Gambar 4.10 *Rangkaian pembangkit gelombang gigi gergaji dari Op-Amp dan saklar*

COPY

Persamaan tegangan output gelombang tanjakan (Vo) adalah $Vo = -\frac{Vi}{Ri.C}.t$

Pada saat Vo = Vp yaitu pada t = T dan $Vo = -\frac{Vi}{Ri.C}.t$.

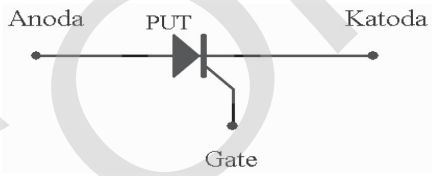
$Vp = -\frac{Vi}{Ri.C}.T$ sehingga $T = -\frac{Ri.C.Vp}{Vi}$ (4.41)

dan frekuensi osilasinya adalah $fo = \frac{1}{T} = -\frac{Vi}{Ri.C.Vp}$ (4.42)

Untuk menghasilkan gelombang gigi gergaji yang bekerja secara otomatis untuk menggantikan fungsi saklar yang bekerja secara manual maka diganti dengan rangkaian komponen yang dihubungkan secara paralel dengan kapasitor pada rangkaian *ramp generator*. Komponen tersebut harus dapat berfungsi sebagai berikut:

1. Memantau tegangan kapasitor apakah sudah mencapai tegangan puncak (Vp),
2. Menjadi rangkaian hubung singkat apabila tegangan pada ujungnya sama dengan tegangan gate,
3. Memantau tegangan kapasitor apakah sudah sama dengan nol,
4. Menjadi rangkaian terbuka apabila tegangan ujungnya sama dengan nol.

Komponen yang dapat berfungsi seperti di atas adalah PUT (*Programmable Unijunction Transistor*). Simbol dari PUT seperti SCR, tetapi fungsinya berbeda.



Gambar 4.11 *Simbol komponen PUT*

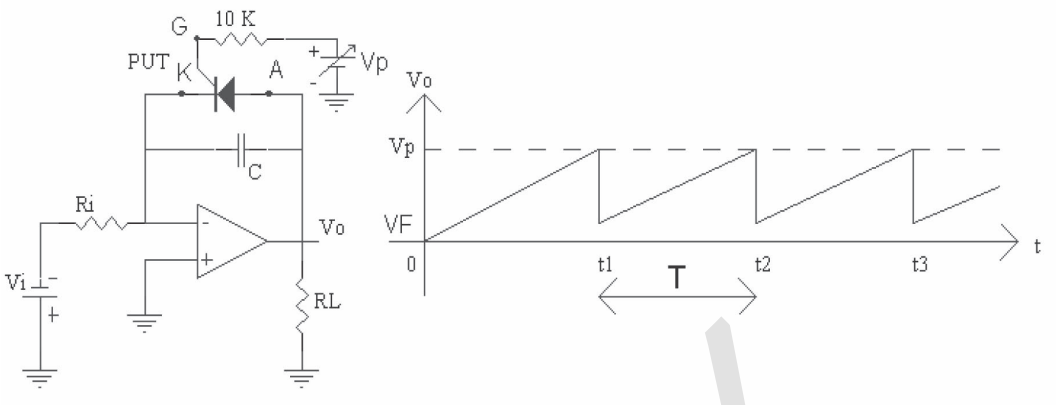
Karena PUT adalah suatu komponen yang terbuat dari bahan semikonduktor maka pada daerah persambungan p-n (*p-n junction*) akan mengalami tegangan drop sebesar 1 volt. Cara memasang komponen PUT dengan *ramp generator* sehingga membentuk pembangkit gelombang gigi gergaji seperti pada Gambar 4.12 dan bentuk gelombang yang dihasilkannya. Karena tegangan nol tidak sampai sama dengan nol, tetapi sama dengan tegangan drop pada p-n sebesar 1 volt sehingga:

Persamaan tegangan output (Vo) adalah $Vo = -\frac{Vi}{Ri.C}.t$, sedangkan periode dan frekuensinya adalah:

Periodenya $T = -\frac{Ri.C.(Vp - 1)}{Vi}$ (4.43)

Frekuensi osilasinya adalah $fo = \frac{1}{T} = -\frac{Vi}{Ri.C.(Vp - 1)}$ (4.44)

Rangkaiannya seperti berikut.



Gambar 4.12 *Rangkaian pembangkit gelombang gigi gergaji dari Op-Amp dan PUT*

Contoh 4.16

Diketahui rangkaian pada Gambar 4.12 dengan Ri = 10 K, C = 100 nF, RL = 10 K. pada PUT = 1 volt, Vp = 5 volt, op-amp mempunyai data ± V = ± 12 volt ; ± Vsat = ± 10 volt. Hitunglah frekuensi osilasi apabila Vi sama dengan 1 V, 2 V, 3 V, 4 V, 5 V.

Penyelesaian:

$$\text{Jika Vi} = 1 \text{ v maka } fo = \frac{Vi}{Ri.C.(Vp-1)} = \frac{1}{10^4.10^{-7}.(5-1)} = 250\text{Hz}$$

$$\text{Jika Vi} = 2 \text{ v maka } fo = \frac{Vi}{Ri.C.(Vp-1)} = \frac{2}{10^4.10^{-7}.(5-1)} = 500\text{Hz}$$

$$\text{Jika Vi} = 3 \text{ v maka } fo = \frac{Vi}{Ri.C.(Vp-1)} = \frac{3}{10^4.10^{-7}.(5-1)} = 750\text{Hz}$$

$$\text{Jika Vi} = 4 \text{ v maka } fo = \frac{Vi}{Ri.C.(Vp-1)} = \frac{4}{10^4.10^{-7}.(5-1)} = 1000\text{Hz}$$

$$\text{Jika Vi} = 5 \text{ v maka } fo = \frac{Vi}{Ri.C.(Vp-1)} = \frac{5}{10^4.10^{-7}.(5-1)} = 1250\text{Hz}$$

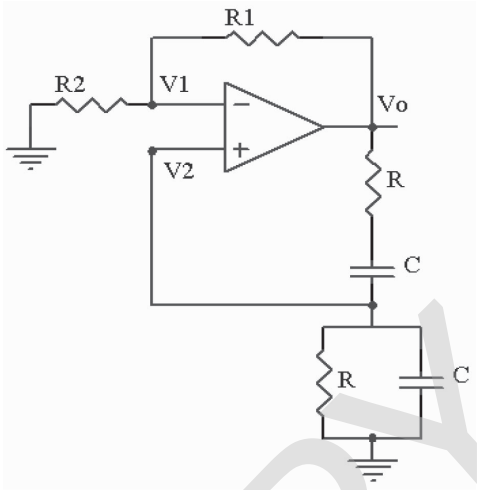
Dari contoh di atas maka rangkaian tersebut dinamakan juga sebagai VCO (*Voltage Controlled Oscillator*) yaitu osilator yang frekuensinya diatur oleh tegangan.

4.7 Osilator Gelombang Sinus (*Oscillator*)

Bentuk lain dari sebuah *oscillator* yang menggunakan rangkaian RC dinamakan *oscillator* jembatan Wien dengan menggunakan op-amp sebagai komponen aktif. Sinyal *output* dihasilkan oleh karena adanya tegangan kecil yang diperkuat oleh rangkaian sehingga menjadi besar. Sinyal yang masuk terdiri dari berbagai frekuensi

COPY

sehingga semuanya dikuatkan. Sinyal yang sama dengan frekuensi resonansi yang beda phasenya sama dengan nol yang dihasilkannya dengan analisis sebagai berikut:



Gambar 4.13 *Rangkaian osilator gelombang sinus dari Op-Amp (osilator jembatan Wein)*

Analisis untuk mencari frekuensi osilasi dari rangkaian yaitu dari frekuensi resonansinya sebagai berikut bahwa tegangan *output* Vo sama dengan gain (A) dengan selisih tegangan *input* (V2-V1):

$$Vo = A(V2 - V1) \tag{4.45}$$

$$V1 = \frac{R2}{R1 + R2}.Vo \tag{4.46}$$

$$V2 = \frac{\dfrac{R.\dfrac{1}{j\omega C}}{R + \dfrac{1}{j\omega C}}}{\dfrac{R.\dfrac{1}{j\omega C}}{R + \dfrac{1}{j\omega C}} + R + \dfrac{1}{j\omega C}} Vo = \frac{\dfrac{R}{1 + j\omega RC}}{\dfrac{R}{1 + j\omega RC} + R + \dfrac{1}{j\omega C}} Vo = \frac{R}{R + R(1 + j\omega RC) + \dfrac{1 + j\omega RC}{j\omega C}} Vo \tag{4.47}$$

$$V2 = \frac{1}{1 + (1 + j\omega C) + \dfrac{(1 + j\omega RC)}{j\omega RC}} Vo = \frac{j\omega RC}{3j\omega RC + 1 - \omega^2 R^2 C^2} Vo = \frac{j\omega CR}{1 - \omega^2 C^2 R^2 + j3\omega CR}.Vo$$

$$Vo = A(V2 - V1)$$

$$Vo = A\left(\frac{j\omega CR}{1 - \omega^2 C^2 R^2 + j3\omega CR}.Vo - \frac{R2}{R1 + R2}.Vo\right)$$

$$Vo\left(1 - A.\frac{j\omega CR}{1 - \omega^2 C^2 R^2 + j3\omega CR} + A.\frac{R2}{R1 + R2}\right) = 0$$

$$\left(1 - \frac{A.j\omega CR}{1 - \omega^2 C^2 R^2 + j3\omega CR} + \frac{A.R2}{R1 + R2}\right) = 0$$

COPY

$$\left(1+\frac{A.R2}{R1+R2}+j\frac{-A.\omega CR}{\left(1-\omega^2C^2R^2+j3\omega CR\right)}\right)=0 \quad (4.48)$$

Osilasi atau resonansi terjadi apabila pada bagian imajiner = 0

$$\frac{A.\omega_0.CR}{1-\omega_0{}^2C^2R^2+j3\omega_0CR}=0 \quad (4.49)$$

$$\frac{A.\omega_0.CR}{1-\omega_0{}^2C^2R^2+j3\omega_0CR}\times\frac{j\omega_0CR}{j\omega_0CR}=0$$

$$\frac{jA.\omega_0{}^2.C^2R^2}{j\omega_0{}^2C^2R^2-j\omega_0{}^2C^2R^2-3\omega_0CR}=0$$

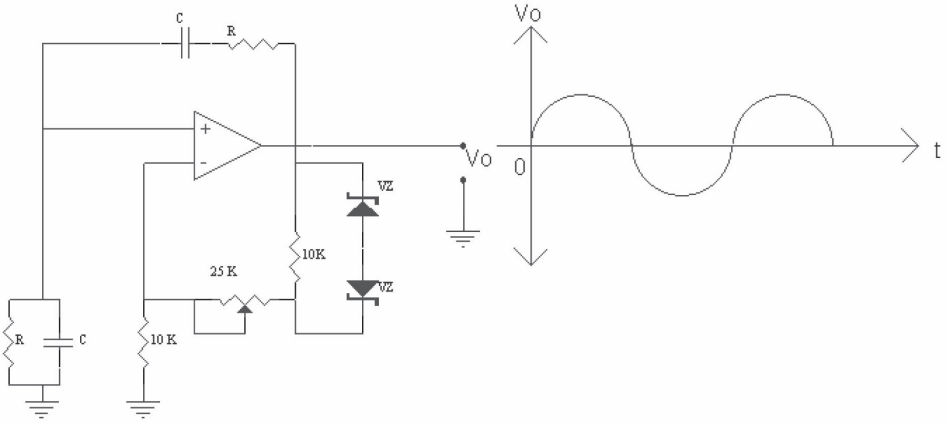
$$\omega_0{}^2C^2R^2=0$$

$$\omega_0{}^2=\frac{1}{C^2.R^2} \text{ atau } \omega_0{}^2=\frac{1}{\sqrt{R^2.C^2}} = \frac{1}{R.C} \quad (4.50)$$

$$f_o = \frac{1}{2.\pi.R.C} \quad (4.51)$$

Frekuensi osilasi yang dihasilkan rangkaian sama dengan frekuensi resonansinya yaitu $\omega_0 = \frac{1}{R.C}$ atau $f_o = \frac{1}{2.\pi.R.C}$. .

Supaya bentuk sinyal sinus yang dihasilkan mempunyai amplitudo yang stabil akibat penguatan yang terus-menerus maka pada rangkaian umpan balik negatif dipasang dioda zener yang dipasang paralel bolak-balik dan penyetelan tahanan umpan balik supaya penguatan *non-inverting* sama dengan 3 kali karena terjadi proses pelemahan sebesar sepertiga pada umpan balik jembatan wien apabila nilai R dan C dibuat sama. Supaya penguatannya sama dengan 3 kali maka nilai R1 = 2 R2 atau sebuah tahanan tetap diseri dengan tahanan variabel (potensiometer). Rangkaiannya menjadi seperti berikut:



Gambar 4.14 *Rangkaian osilator gelombang sinus jembatan Wien*

COPY

Rangkaian di atas akan menghasilkan gelombang sinus dengan amplitudo maksimum-minimum sebesar ± Vsat dan frekuensi osilasi sebesar $f_o = \frac{1}{2.\pi.R.C}$ Hz.

Contoh 4.17

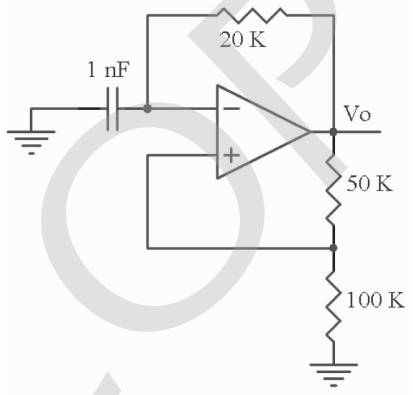
Diketahui rangkaian pada Gambar 4.13 dengan R1 = 20 K, R2 = 10 K, R = 10 K, C = 10 nF , Op-amp dengan data ± V = ± 12 volt ; ± Vsat = ± 10 volt. Hitunglah frekuensi osilasinya!

Penyelesaian:

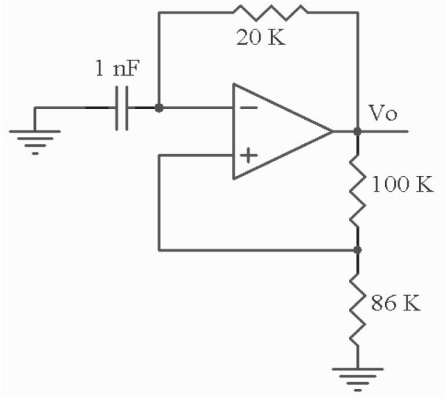
$$f_o = \frac{1}{2.\pi.R.C} = \frac{1}{2.(3,14).10^4.10^{-8}} = \frac{1}{6,28.10^{-4}} = \frac{10000}{6,28} = 1590\text{Hz}$$

Latihan Soal

1. Berapa frekuensi osilasi rangkaian berikut dan berapa tegangan maks. dan min. pada kapasitor? ± V = ± 12 volt; ± Vsat = ± 10 volt

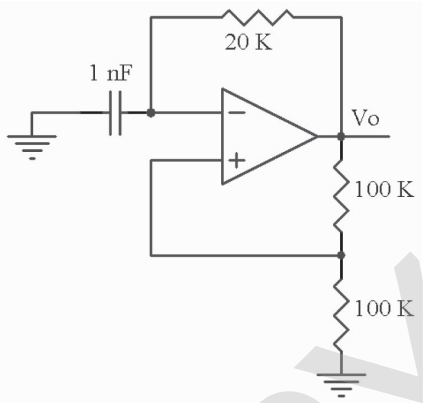


2. Berapa frekuensi osilasi rangkaian berikut dan berapa tegangan maks. dan min. pada kapasitor? ± V = ± 12 volt ; ± Vsat = ± 10 volt.

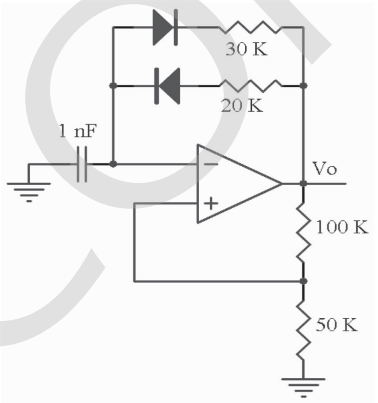


COPY

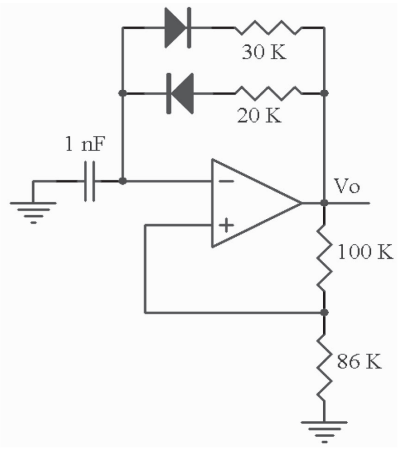
3. Diketahui rangkaian *astable multivibrator* op-ampnya ± V = ± 12 volt; ± Vsat = ± 10 volt. Gambarkan dengan teliti bentuk gelombang *output* (Vo) dan Vc pada satu sumbu salib apabila pada saat t = 0, tegangan Vo = +Vsat, dan Vc = -2 V!



4. Rancanglah rangkaian *astable multivibrator* dengan *duty cycle* sama dengan 50 % dengan amplitude + 10 volt dan frekuensi osilasi 20 Hz!
5. Berapa frekuensi osilasi rangkaian dan *duty cycle* (DC), ± V = ± 12 volt ; ± Vsat = ± 10 volt?

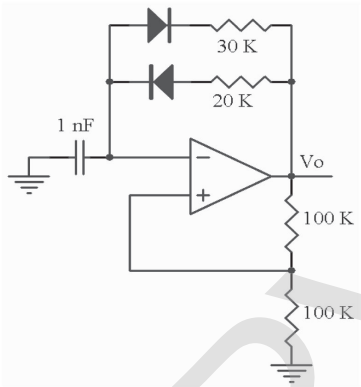


6. Berapa frekuensi osilasi rangkaian dan *duty cycle* (DC), ± V = ± 12 volt ; ± Vsat = ± 10 volt?

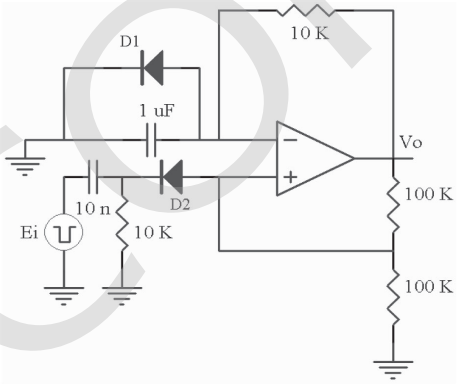


COPY

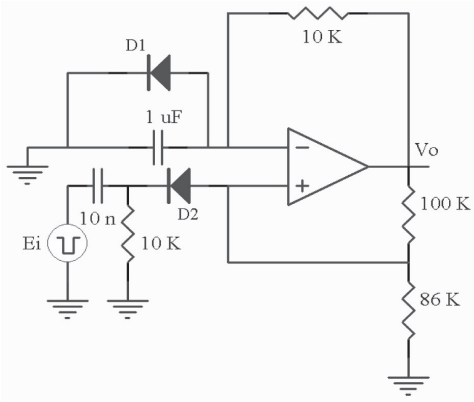
7. Rancanglah rangkaian *astable multivibrator* dengan *duty cycle* sama dengan 40 % dengan amplitude + 10 volt dan frekuensi osilasi 50 Hz!
8. Diketahui rangkaian *astable multivibrator* dan untuk Op-ampnya ± V = ± 12 volt; ± Vsat = ± 10 volt. Gambarkan dengan teliti bentuk gelombang *output* (Vo) dan Vc pada satu sumbu salib apabila pada saat t = 0, tegangan Vo = -Vsat, dan Vc = -1 V!



9. Berapa lebar pulsa tegangan output (T) dan waktu pemulihan (tr), ± V = ± 12 volt; ± Vsat = ± 10 volt?

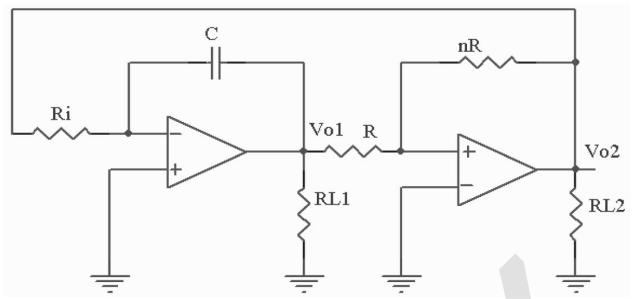


10. Berapa lebar pulsa tegangan *output* (T) dan waktu pemulihan (tr), ± V = ± 12 volt; ± Vsat = ± 10 volt?

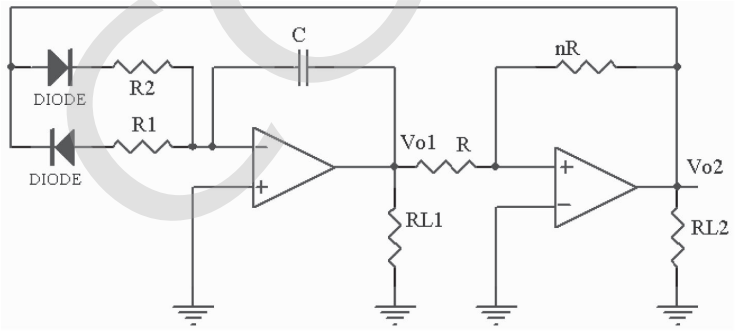


COPY

11. Diketahui pada Gambar 4.8 yaitu Ri = 10 K, R = 10 K, n.R = 40 K, C = 10 nF, dan RL1 = RL2 = 10 K, Op-amp dengan data ± V = ± 12 volt; ± Vsat = ± 10 volt. Hitunglah waktu rendah dan waktu tinggi, periode dan frekuensi osilasi, *duty cycle*, tegangan *output* maksimum-minimum.

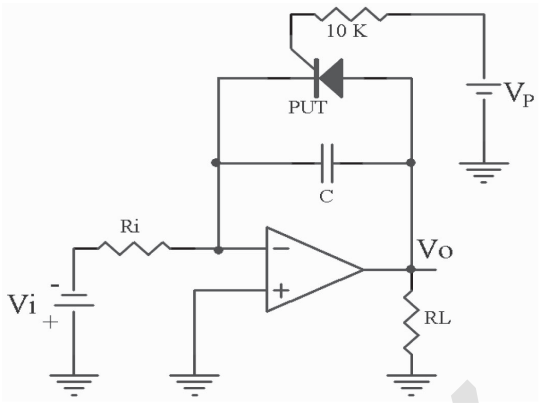


12. Diketahui rangkaian pembangkit gelombang segitiga dan gelombang persegi dan untuk Op-ampnya ± V = ± 12 volt; ± Vsat = ± 10 volt. Gambarkan dengan teliti bentuk gelombang *output* segitiga (Vo1) dengan nilai maksimum-minimum ± 2 volt dan tegangan *output* persegi (Vo2) pada satu sumbu salib apabila pada saat t = 0, tegangan Vo1 = + 1 volt dan Vo2 = -Vsat dengan frekuensi osilasi sama dengan 50 Hz dan DC = 50%!
13. Diketahui pada gambar di bawah yaitu R1 = 10 K, R2 = 20 K, R = 10 K, n.R = 40 K, Ci = 10 nF dan RL = 10 K, Op-amp dengan data ± V = ± 12 volt; ± Vsat = ± 10 volt. Hitunglah waktu rendah dan waktu tinggi, periode dan frekuensi osilasi, *duty cycle*, tegangan *output* maksimum-minimum!

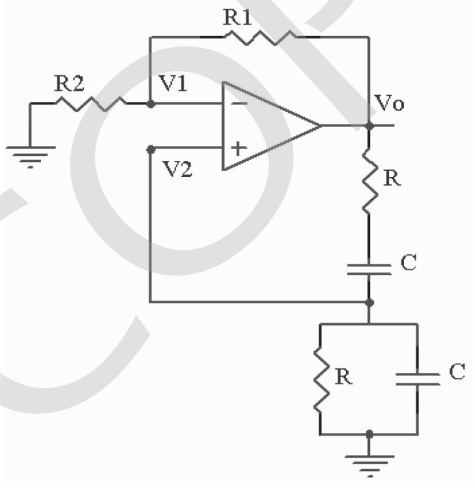


14. Diketahui rangkaian pembangkit gelombang segitiga dan gelombang persegi dan untuk Op-ampnya + V = + 12 volt; + Vsat = + 10 volt. Gambarkan dengan teliti bentuk gelombang output segitiga (Vo1) dengan nilai maksimum-minimum + 5 volt dan tegangan output persegi (Vo2) pada satu sumbu salib apabila pada saat t = 0, tegangan Vo1 = + 3 volt dan Vo2 = +Vsat dengan frekuensi osilasi sama dengan 200 Hz dan DC = 60%!
15. Diketahui rangkaian pada gambar di bawah dengan Ri = 10 K, C = 100 nF, RL = 10 K. V_F = 1 volt pada PUT, Vp = 5 volt, op-amp mempunyai data ± V = ± 12 volt; ± Vsat = ± 10 volt. Hitunglah frekuensi osilasi apabila Vi sama dengan 1 V, 2 V, 3 V, 4 V, 5 V!

COPY



16. Rancanglah rangkaian pembangkit gelombang gigi gergaji dengan amplitude + 6 volt dan frekuensi 100 Hz!
17. Diketahui rangkaian pada gambar di bawah dengan R1 = 20 K, R2 = 10 K, R = 150 K, C = 10 nF, Op-amp dengan data ± V = ± 12 volt; ± Vsat = ± 10 volt. Hitunglah frekuensi osilasinya!



COPY

BAB 5

Rangkaian Op Amp dengan Dioda

COPY

Pada rangkaian penyearah yang menggunakan dioda silikon, rangkaian penyearahnya tidak dapat menyearahkan tegangan yang mempunyai amplitude di bawah 0,6 volt (karena tegangan drop pada dioda silikon sebesar 0,6volt). Dengan menggunakan sebuah op amp dan dua buah dioda biasa dapat dirancang rangkaian yang berfungsi sebagai penyearah meskipun tegangan yang disearahkan di bawah 0,6 volt. Dari rangkaian ini dapat disusun rangkaian penyearah setengah gelombang linier dan rangkaian penyearah gelombang penuh yang presisi.

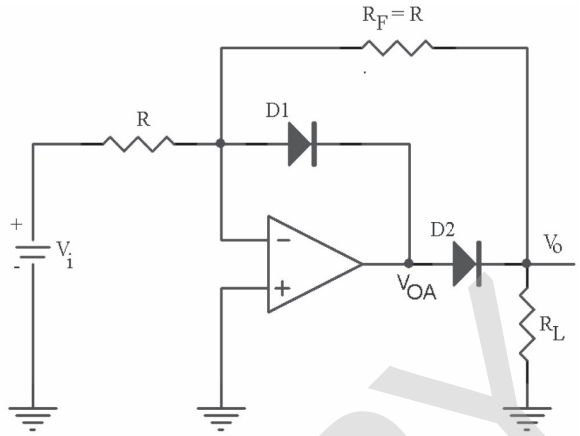
Pemakaian dari rangkaian penyearah sebagai:

1. Rangkaian pendeteksi sinyal modulasi amplitude (AM),
2. Rangkaian pendeteksi harga puncak,
3. Rangkaian pendeteksi polaritas sinyal,
4. Rangkaian harga mutlak,
5. Rangkaian perata,
6. Rangkaian pengubah ac ke dc.

5.1 Penyearah Gelombang Setengah Linear (*Linear Half Wave Rectifier*)

Rangkaian penyearah gelombang setengah linear hanya menghasilkan setengah siklus dari sinyal dan menghilangkan yang lainnya. Setengah siklus tegangan masukan yang dihasilkan bisa berbalik atau tidak terbalik. Masukan tersebut bisa

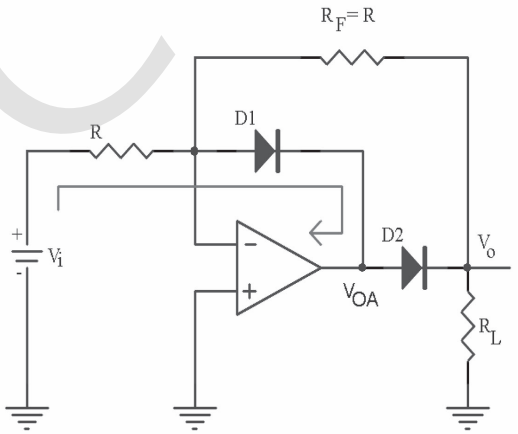
mengalami penguatan, pelemahan, atau tetap tergantung dari pemilihan tahanan dan dioda yang digunakan serta penempatannya pada op amp.



Gambar 5.1 *Rangkaian Penyearah Setengah Linear*

5.1.1 Penyearah Gelombang Setengah Linear, Pembalik, Keluaran Positif

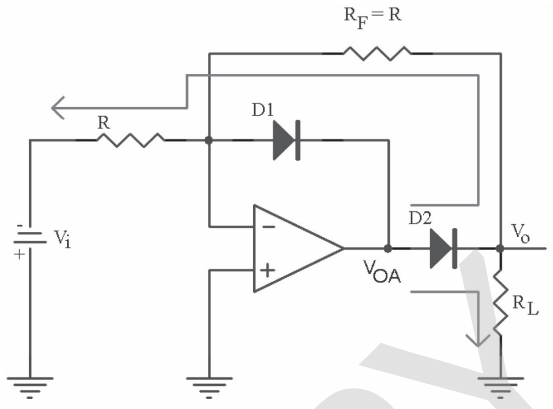
Rangkaian penguat pembalik (*inverting*) dapat diubah menjadi penyearah gelombang setengah dengan menambahkan dua buah dioda seperti pada Gambar 5.2. Apabila Vi positif maka dioda D1 dialiri arus sehingga menjadi bias arah maju (*forward bias*) yang menyebabkan tegangan *output* op-amp (V_{OA}) menjadi negatif sebesar tegangan drop pada dioda. Hal tersebut menyebabkan dioda D2 menjadi bias arah balik (*reverse bias*) sehingga tegangan *output* (Vo) sama dengan nol volt karena tidak ada arus yang melewati tahanan Rf.



Gambar 5.2 *Rangkaian Penyearah Setengah Gelombang dengan input positip keluaran nol*

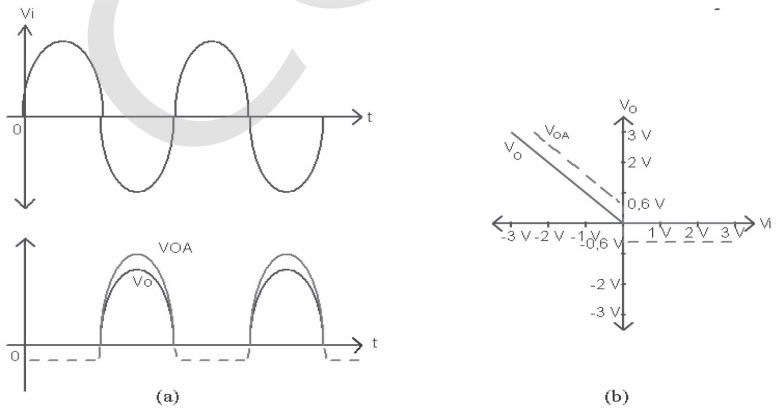
Sedangkan seperti pada Gambar 5.3 apabila Vi negatif maka tegangan *output* op-amp menjadi positif dan menyebabkan dioda D2 dialiri arus dan rangkaian bekerja seperti rangkaian pembalik (*inverting*) dan Vo sama dengan – (-Vi) = Vi. Karena masukan negatifnya merupakan *virtual ground* maka D1 menjadi bias arah balik

(*reverse bias*). Arus masukannya sebesar $I = -\frac{Vi}{Ri}$ dan penguatannya sebesar $-\frac{Rf}{Ri}$ dan persamaan ini hanya berlaku untuk masukan negatif dan Vo hanya mempunyai nilai positif dan nol. Contoh apabila Vi = -0,1 volt maka tegangan Vi dan Ri menyebabkan adanya arus yang mengalir melalui D2.



Gambar 5.3 *Rangkaian Penyearah Setengah Gelombang dengan input negatif keluaran positif*

Hubungan tegangan *input* (Vi) dengan tegangan *output* (Vo) atau karakteristik tegangan *input* dan tegangan *output* seperti ditunjukkan pada Gambar 5.4 dan terlihat bahwa apabila tegangan input (Vi) berpindah dari positif ke negatif (memotong nol volt) maka tegangan *output* op-amp (V_{OA}) meloncat dengan cepat dari -0,6 volt ke +0,6 volt ketika berpindah dari pensuplaian untuk penurunan pada D2 ke pensuplaian untuk penurunan pada D1. Perpindahan ini dapat dimonitor dengan sebuah *differentiator* untuk menunjukkan penyilangan nol.

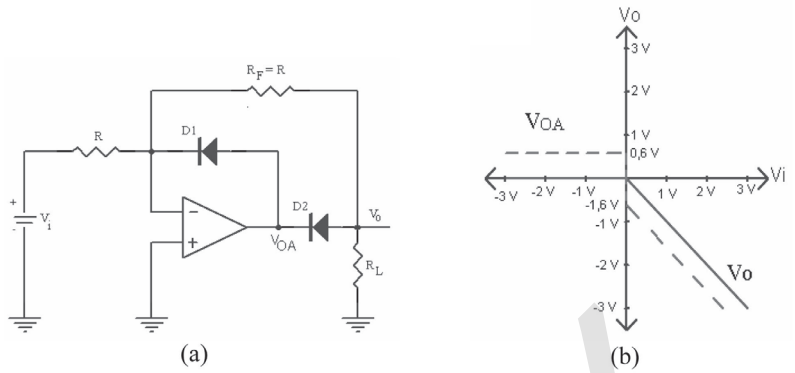


Gambar 5.4 (a) *Hubungan tegangan input dan output (b) Karakteristik Vi dan Vo*

5.1.2 Penyearah Gelombang Setengah Linear, Pembalik, Keluaran Negatif

Apabila pada rangkaian penyearah gelombang setengah linear, pembalik, keluaran positif arah dioda D1 dan D2 dibalik maka menjadi rangkaian penyearah gelombang setengah linear, pembalik, keluaran negatif seperti pada Gambar 5.5(a) dan karakteristiknya pada Gambar 5.5(b). Apabila tegangan *input*-nya positif maka

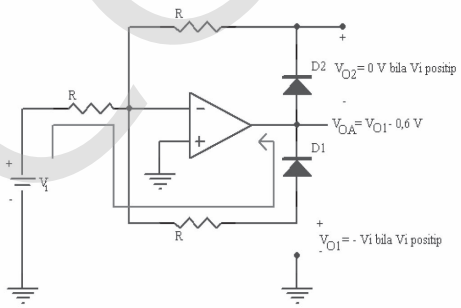
tegangan *output*-nya negatif dan apabila tegangan *input*-nya negatif maka tegangan *output*-nya sama dengan nol volt.



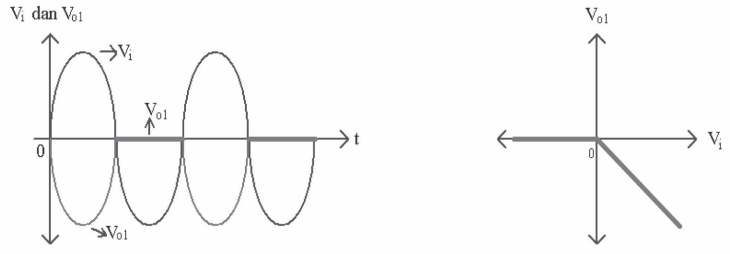
Gambar 5.5 *(a) Rangkaian penyearah setengah gelombang dengan keluaran negatif (b) Karakteristik tegangan input (Vi) dengan tegangan output (Vo)*

5.1.3 Pemisah Polaritas Sinyal

Apabila rangkaian penyearah setengah sebelumnya dimodifikasi seperti pada Gambar 5.6 maka akan menjadi rangkaian pemisah polaritas. Apabila tegangan *input* (Vi) adalah tegangan positif maka arus akan mengalir melewati D1 sehingga tegangan Vo1 sama dengan negatif Vi dan tegangan *output* op-amp (VoA) sama dengan (Vo1 – 0,6) volt. Sedangkan Vo2 sama dengan nol karena D2 tidak dilewati arus sehingga tersambung langsung dengan masukan *inverting* yang merupakan *virtual ground*.



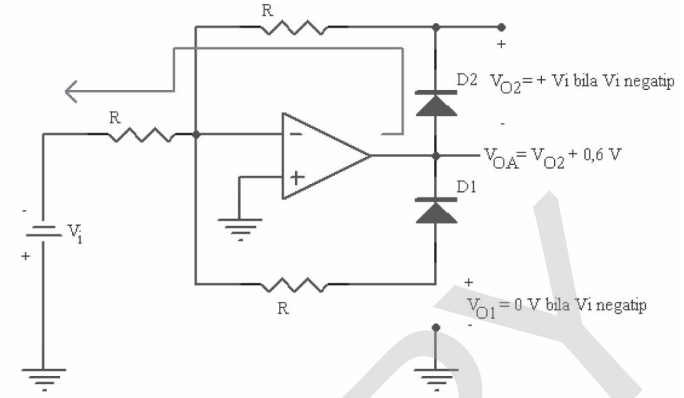
Gambar 5.6 *Rangkaian pemisah polaritas dengan input positif*



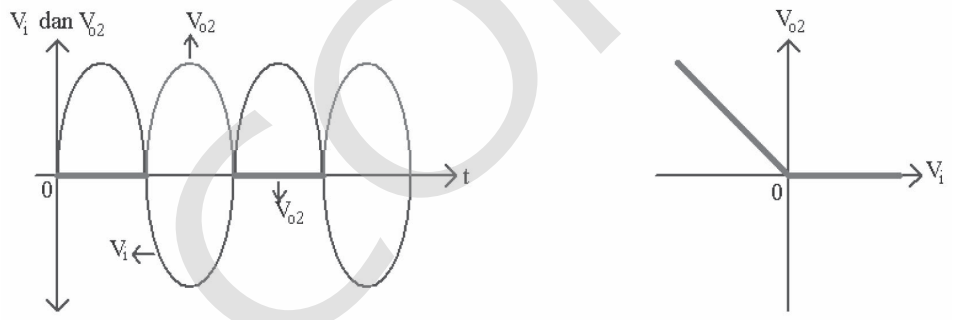
Gambar 5.7 *Karakteristik tegangan Vi dan Vo1*

Sedangkan pada Gambar 5.8 juga merupakan rangkaian pemisah polaritas, tetapi dengan *input* tegangan

negatif. Apabila tegangan *input* (Vi) adalah tegangan negatif maka arus akan mengalir melewati D2 sehingga tegangan Vo2 sama dengan negatif (-Vi) atau positif Vi dan tegangan *output* op-amp (VoA) sama dengan (Vo2 + 0,6) volt. Sedangkan Vo1 sama dengan nol karena D1 tidak dilewati arus sehingga tersambung langsung dengan masukan *inverting* yang merupakan *virtual ground*.



Gambar 5.8 *Rangkaian pemisah polaritas dengan input negatif*



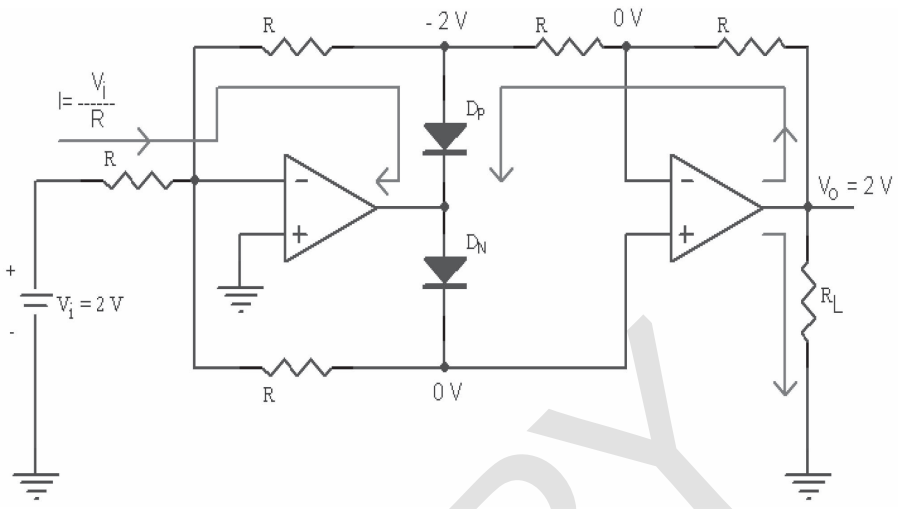
Gambar 5.9 *Karakteristik tegangan Vi dan Vo2*

5.2 Penyearah yang Presisi (Rangkaian Harga Mutlak)

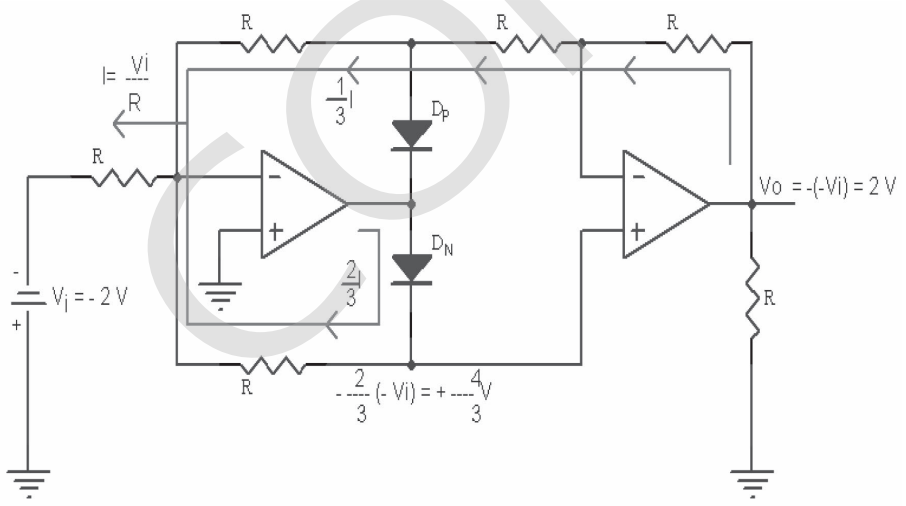
Penyearah gelombang setengah presisi hanya menghasilkan satu polaritas sinyal masukan dan membalik yang lain dan mampu menyearahkan tegangan masukan beramplitudo milivolt. Jenis rangkaian ini berguna untuk perkalian, meratakan sinyal atau medemodulasi sinyal. Penyearah presisi disebut juga sebagai rangkaian harga mutlak. Karakteristik tegangan Vi dan tegangan Vo seperti berikut.

COPY

5.2.1 Penyearah Presisi Gelombang Penuh dengan Resistansi yang Sama



Gambar 5.10 *Untuk input positif maka dioda Dp yang dialiri arus*

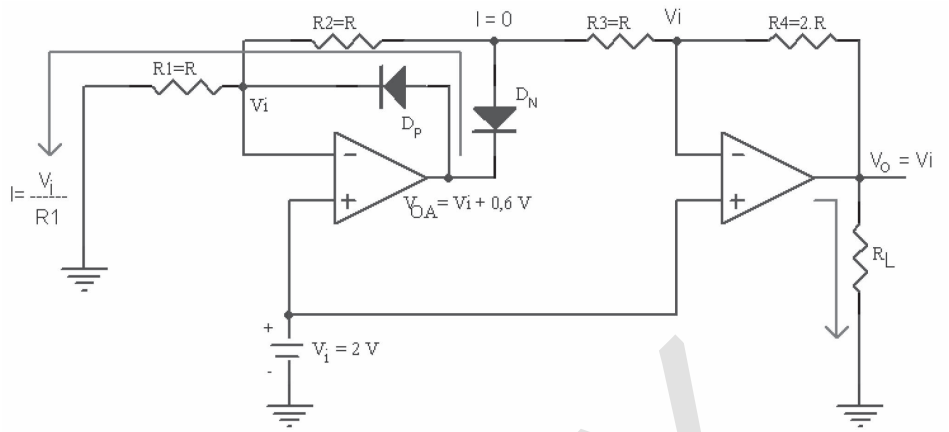


Gambar 5.11 *Untuk input negatif maka dioda Dn yang dialiri arus*

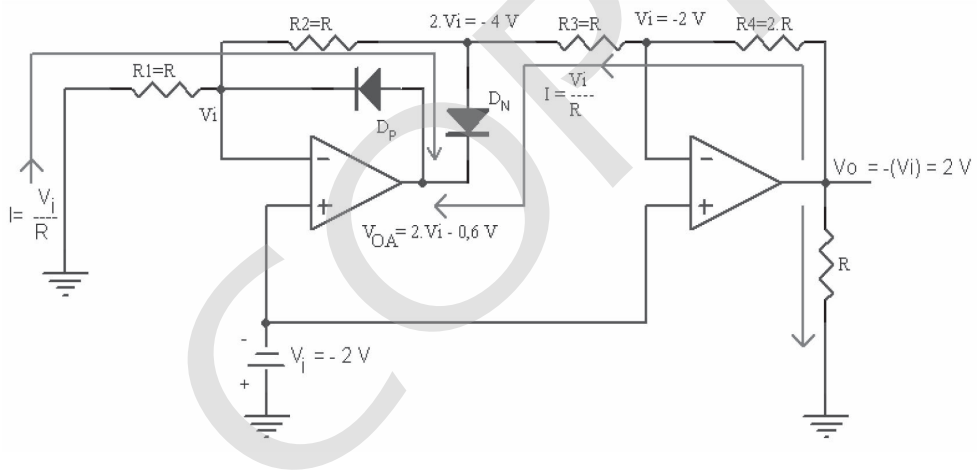
Penyearah gelombang penuh presisi (harga mutlak) pada gambar di atas mempunyai tahanan yang sama yaitu R dan mempunyai impedansi masukan sebesar R. Untuk sinyal masukan positif maka dioda Dp yang dialiri arus dan op-amp A dan B berfungsi sebagai pembalik dan nilai tegangan *output* Vo = +Vi. Sedangkan untuk sinyal masukan negatif maka dioda Dn yang dialiri. Arus masukan I terbagi seperti terlihat di gambar sehingga op-amp B bekerja sebagai pembalik. Jadi, tegangan *output* Vo sama dengan harga mutlak Vi.

COPY

5.2.2 Penyearah Presisi Gelombang Penuh dengan Impedansi Masukan Tinggi



Gambar 5.12 *Level Tegangan Pada Masukan Positif sehingga Vo = +Vi untuk semua Vi*

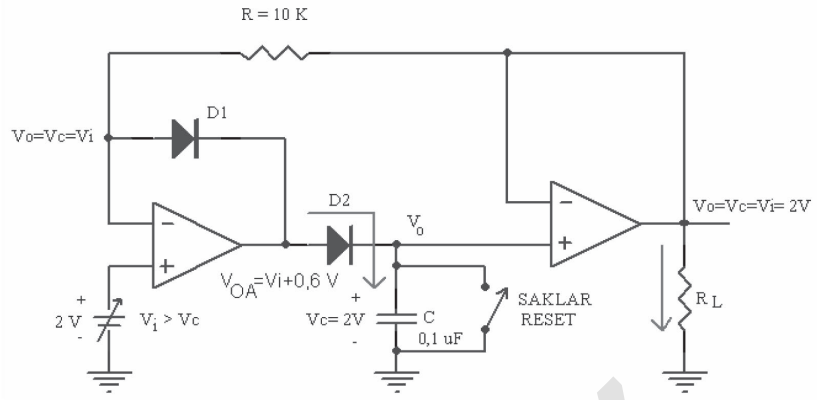


Gambar 5.13 *Level tegangan bernilai negatif sehingga Vo = + Vi puncaknya*

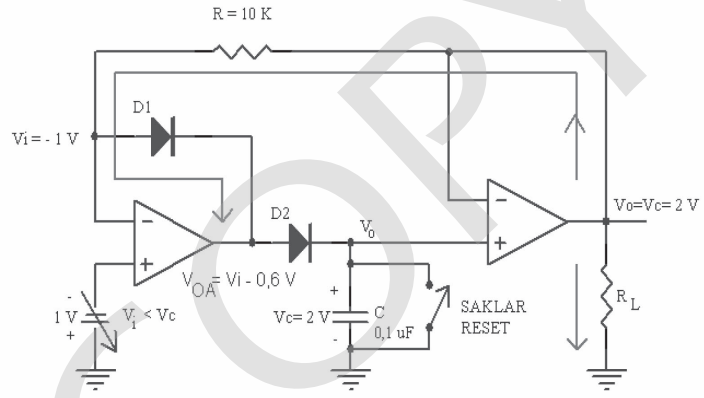
Jenis penyearah presisi gelombang penuh yang kedua adalah sinyal masukan Vi masuk ke masukan positif op-amp sehingga mempunyai impedansi masukan yang juga tinggi yaitu sama dengan impedansi masukannya. Apabila sinyal masukan Vi berharga positif maka Vo juga berharga positif. Sedangkan untuk sinyal masukan Vi berharga negatif maka Vo selalu berharga positif (harga mutlaknya).

5.3 Pendeteksi Puncak (*Peak Detector*)

Rangkaian op-amp dengan dioda selain sebagai penyearah sinyal yang presisi juga dapat difungsikan sebagai pendeteksi puncak tegangan masukan Vi. Rangkaian ini mengikuti puncak sinyal masukan yang disimpan pada kapasitor. Jika ada sinyal masukan yang lebih tinggi lagi maka akan disimpan lagi di kapasitor seperti pada Gambar 5.14. Apabila sinyal masukan Vi menurun seperti pada Gambar 5.15 maka kapasitor tidak bisa "*discharge*" karena dioda D2 dalam mode bias arah balik (*reverse bias*).



Gambar 5.14 *Pendeteksi puncak positif jika Vi > Vc maka kapasitor charge*



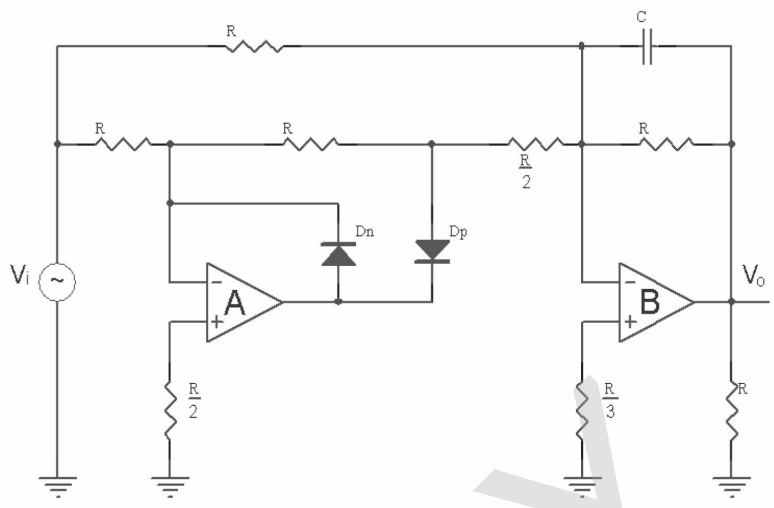
Gambar 5.15 *Pendeteksi puncak positif apabila Vi < Vc*

Apabila arah dua buah dioda dibalik maka akan menjadi pendeteksi tegangan lembah (tegangan yang paling kecil atau paling negatif).

5.4 Pengubah AC ke DC (*AC to DC Converter*)

Apabila sinyal masukan Vi berharga positif maka arah arus keluar dari Vi yang arahnya ke atas sehingga arus melewati Dp karena forward bias, sedangkan Dn arah balik (*reverse bias*). Op-amp A berfungsi sebagai pembalik dan op-amp B sebagai penjumlah pembalik sehingga tegangan *output* Vo sama dengan Vi. Dan apabila Vi negatif maka arus melewati dioda Dn dan *output* dari op-amp A adalah nol sehingga op-amp B hanya membalik tegangan Vi dan Vo = Vi. Fungsi dari kapasitor C sebagai perata-rata tegangan *output* Vo.

COPY



Gambar 5.16 *Rangkaian peubah ac ke dc*

COPY

Latihan Soal

1. Jika Vi adalah gelombang sinus dengan puncak sama dengan 1 volt, gambarkan Vo terhadap t apabila Vi sebagai sinyal masukan pada Gambar 5.3!
2. Jika Vi adalah gelombang sinus dengan puncak sama dengan 1 volt, gambarkan Vo terhadap t apabila Vi sebagai sinyal masukan pada Gambar 5.5!
3. Jika Vi adalah gelombang sinus dengan puncak sama dengan 1 volt, gambarkan Vo terhadap t apabila Vi sebagai sinyal masukan pada Gambar 5.6!
4. Jika Vi adalah gelombang sinus dengan puncak sama dengan 1 volt, gambarkan Vo terhadap t apabila Vi sebagai sinyal masukan pada Gambar 5.8!
5. Jika Vi adalah gelombang sinus dengan puncak sama dengan 1 volt, gambarkan Vo terhadap t apabila Vi sebagai sinyal masukan pada Gambar 5.10!
6. Jika Vi adalah gelombang sinus dengan puncak sama dengan 1 volt, gambarkan Vo terhadap t apabila Vi sebagai sinyal masukan pada Gambar 5.11!
7. Jika Vi adalah gelombang sinus dengan puncak sama dengan 1 volt, gambarkan Vo terhadap t apabila Vi sebagai sinyal masukan pada Gambar 5.12!
8. Jika Vi adalah gelombang sinus dengan puncak sama dengan 1 volt, gambarkan Vo terhadap t apabila Vi sebagai sinyal masukan pada Gambar 5.13!
9. Jika Vi adalah gelombang sinus dengan puncak sama dengan 1 volt, gambarkan Vo terhadap t apabila Vi sebagai sinyal masukan pada Gambar 5.14!

COPY

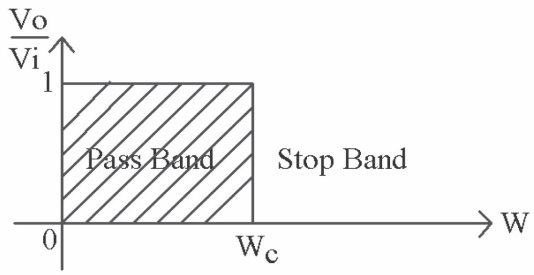
BAB 6

Perencanaan Filter Aktif

COPY

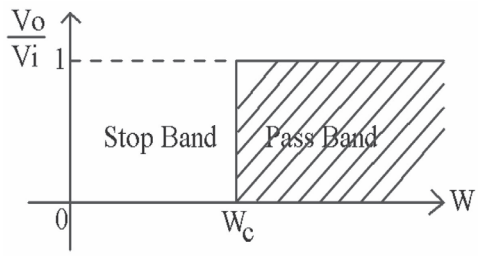
Rangkaian filter (penyaring) adalah rangkaian yang berfungsi untuk melewatkan sinyal pada daerah frekuensi tertentu dan membuang sinyal pada daerah frekuensi lainnya. Rangkaian filter dibagi menjadi dua yaitu rangkaian filter pasif dan rangkaian filter aktif. Rangkaian filter pasif tersusun dari komponen pasif yaitu resistor, induktor, dan kapasitor. Sedangkan rangkaian filter aktif tersusun dari komponen semikonduktor yaitu resistor, kapasitor, dan op-amp. Rangkaian filter terdiri 4 jenis yaitu LPF (*Low Pass Filter*), HPF (*High Pass Filter*), BPF (*Band Pass Filter*), BSF (*Band Stop Filter*) atau *Notch filter*. Pada pembahasan ini yang digunakan adalah filter Butterworth. Frekuensi respons (tanggapan frekuensi) untuk rangkaian filter ideal sebagai berikut.

- Frekuensi respons untuk LPF



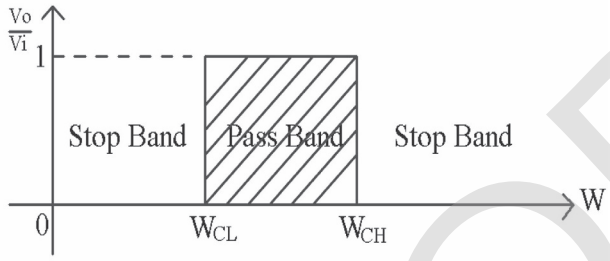
ω_c adalah frekuensi *cut-off* (frekuensi potong) yaitu frekuensi batas.

- Frekuensi respons untuk HPF



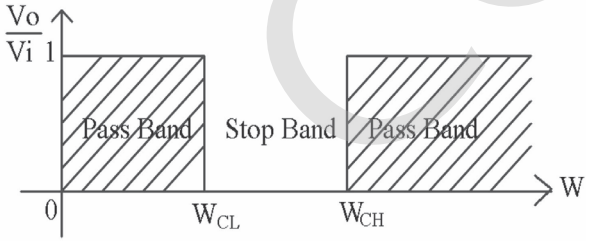
ω_c adalah frekuensi cut-off (frekuensi potong) yaitu frekuensi batas.

- Frekuensi respons untuk BPF



ω_{CL} adalah frekuensi *cut-off low* atau frekuensi batas bawah (rendah).
ω_{CH} adalah frekuensi *cut-off high* atau frekuensi batas atas (tinggi).

- Frekuensi respons untuk BSF atau *Notch Filter*



ω_{CL} adalah frekuensi *cut-off low* atau frekuensi batas bawah (rendah).
ω_{CH} adalah frekuensi *cut-off high* atau frekuensi batas atas (tinggi).

6.1 LPF (*Low Pass Filter*)

LPF (*Low Pass Filter*) adalah filter yang melewatkan sinyal dengan frekuensi di bawah frekuensi tertentu atau frekuensi *cut-off* (ω_C) dan membuang sinyal dengan frekuensi di atas frekuensi *cut-off* (ω_C). Beberapa jenis LPF adalah LPF -20 dB/dec, LPF -40 dB/dec, LPF -60 dB/dec.

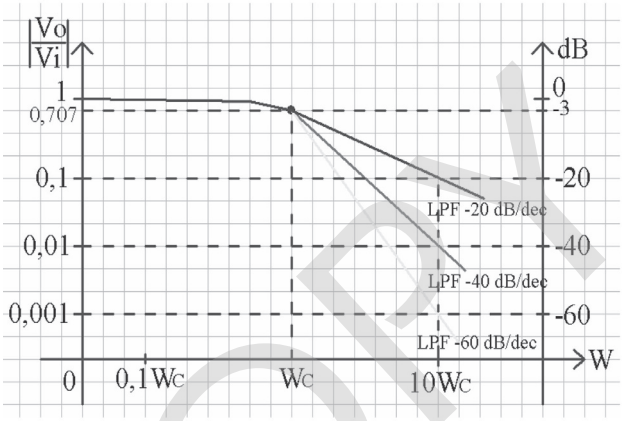
LPF -20 dB/dec adalah LPF yang penguatannya turun sebesar -20 dB apabila frekuensinya naik sebesar 10 kali atau satu decade. Pada saat frekuensi sinyal input sama dengan frekuensi *cut-off* (ω_C) maka penguatannya sama dengan $\frac{1}{\sqrt{2}}$ atau 0,707 dan sudut phasenya sebesar -45^o.

COPY

LPF -40 dB/dec adalah LPF yang penguatannya turun sebesar -40 dB apabila frekuensinya naik sebesar 10 kali atau satu decade. Pada saat frekuensi sinyal *input* sama dengan frekuensi *cut-off* (ω_C) maka penguatannya sama dengan $\frac{1}{\sqrt{2}}$ atau 0,707 dan sudut phasenya sebesar -90^o.

LPF -60 dB/dec adalah LPF yang penguatannya turun sebesar -60 dB apabila frekuensinya naik sebesar 10 kali atau satu decade. Pada saat frekuensi sinyal *input* sama dengan frekuensi *cut-off* (ω_C) maka penguatannya sama dengan $\frac{1}{\sqrt{2}}$ atau 0,707 dan sudut phasenya sebesar -135^o.

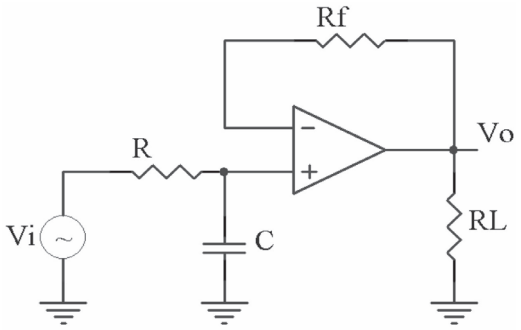
Grafik Respons Frekuensi (Tanggapan Frekuensi) untuk LPF



Dari grafik respons frekuensi pada LPF, semakin besar penurunannya maka grafik di atas frekuensi *cut-off* (ω_C) menjadi semakin curam atau semakin mendekati LPF ideal.

6.1.1 LPF -20 dB/dec

Rangkaian LPF-20 dB/dec dengan menggunakan komponen semikonduktor (op-amp) sebagai berikut. Op-amp berfungsi sebagai *buffer* (penyangga), sedangkan rangkaian depannya adalah sebuah filter pasif dari rangkaian R-C. Rangkaian filter R-C apabila berdiri sendiri maka impedansi *output*-nya akan selalu berubah apabila frekuensi sinyal *input* berubah. Apabila digabung dengan rangkaian buffer maka impedansi *output*-nya menjadi tetap dan nilainya kecil karena sama dengan impedansi dari op-amp.



Gambar 6.1 *Rangkaian LPF -20 dB/dec*

COPY

Analisis dari rangkaian filter LPF -20 dB/dec sebagai berikut. Tegangan *output* (Vo) diumpanbalikkan pada titik masukan negatif (*negative input*). Karena op-amp ideal maka tegangan selisih (*differential input*) sama dengan nol, tegangan pada masukan negatif sama dengan tegangan pada masukan positif yang merupakan tegangan akibat pembagian tegangan sinyal *input* oleh resistor R dan impedansi C dan sama dengan Vo.

$$Vo = \frac{Zc}{R + Zc}.Vi \quad (1)$$

$$Vo = \frac{\frac{1}{j\omega.C}}{R + \frac{1}{j\omega.C}}.Vi \quad (2)$$

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1 + j\omega.C.R} \quad (3)$$

Pada LPF -20 dB/dec bahwa pada $\omega = \omega_C$ maka nilai dan sudut phasenya sama dengan $\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707$. Supaya menghasilkan nilai seperti itu maka nilai pada penyebut pada persamaan (6.3) adalah $|1 + j\omega.C.R| = \sqrt{2}$ sehingga $\omega_C.C.R = 1$ atau $\omega_C = \frac{1}{C.R}$. (4)

Persamaan (6.3) atau *transfer function* $\frac{Vo}{Vi}$ yang merupakan fungsi dari ω_C menjadi:

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1 + j\omega.C} = \frac{1}{1 + j\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} \quad (5)$$

Nilai penguatan $\left|\frac{Vo}{Vi}\right|$ dan sudut phase θ untuk beberapa nilai ω yang berbeda adalah

Tabel 6.1 *Nilai penguatan dan sudut phase LPF -20 dB/dec*

No.	Frekuensi (ω)	Penguatan $\left\|\frac{Vo}{Vi}\right\|$	Sudut phase (θ)
1	$0{,}1\omega_C$	0,9950371902	–5,71°
2	$0{,}25\omega_C$	0,9701425001	–14,04°
3	$0{,}5\omega_C$	0,8944271909	–26,56°
4	ω_C	$\frac{1}{\sqrt{2}}$ atau 0,707	–45°
5	$2\ \omega_C$	0,4472135955	–63,43°
6	$4\ \omega_C$	0,2425356250	–75,96°
7	$10\ \omega_C$	0,0995037190	–84,29°

COPY

Contoh 6.1

Hitunglah frekuensi *cut-off* (ω_C) pada Gambar 5.1 apabila nilai R = 10K, C = 10 nF, Rf = 100 K, RL = 10 K! Apabila Vi = 100sin($\omega.t$ + 30°)mV, hitunglah Vo pada frekuensi 1 Krad/s, 5 Krad/s, 10 Krad/s, 20 Krad/s, 100 Krad/s!

Penyelesaian: Nilai frekuensi cut-off (ω_C) dari LPF -20 dB/dec adalah $\omega_C = \frac{1}{C.R}$

$$\omega_C = \frac{1}{10^{-8}.10^4} = 10^4 \text{ rad/s} = 10 \text{ Krad/s}$$

Untuk ω = 1Krad/s ,

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{1+j\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1+j\left(\frac{1}{10}\right)} = \frac{1}{1+j0,1} = \frac{1}{\sqrt{1+0,1^2}} = 0,995$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{0,1}{1}\right)} = \frac{0^o}{5,71^o} = 0^o - 5,71^o = -5,71^o$$

$$Vo = (0,995).100\sin(10^4.t + 30^o + \theta) = 99,5\sin(10^4.t + 24,29^o)mV$$

Untuk ω = 5Krad/s,

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{1+j\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1+j\left(\frac{5}{10}\right)} = \frac{1}{1+j0,5} = \frac{1}{\sqrt{1+0,5^2}} = 0,894$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{0,5}{1}\right)} = \frac{0^o}{26,56^o} = 0^o - 26,56^o = -26,56^o$$

$$Vo = (0,894).100\sin(10^4.t + 30^o + \theta) = 89,4\sin(10^4.t + 3,44^o)mV$$

Untuk ω = 10Krad/s,

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{1+j\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1+j\left(\frac{10}{10}\right)} = \frac{1}{1+j1} = \frac{1}{\sqrt{1+1^2}} = 0,707$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{1}{1}\right)} = \frac{0^o}{45^o} = 0^o - 45^o = -45^o$$

$$Vo = (0,707).100\sin(10^4.t + 30^o + \theta) = 70,7\sin(10^4.t - 15^o)mV$$

COPY

Untuk ω = 20Krad/s,

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{1+j\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1+j\left(\frac{20}{10}\right)} = \frac{1}{1+j2} = \frac{1}{\sqrt{1+2^2}} = 0{,}447$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{2}{1}\right)} = \frac{0^o}{63{,}43^o} = 0^o - 63{,}43^o = -63{,}43^o$$

$$Vo = (0{,}447).100\sin(10^4.t + 30^o + \theta) = 44{,}7\sin(10^4.t - 33{,}43^o)mV$$

Untuk ω = 100Krad/s,

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{1+j\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1+j\left(\frac{100}{10}\right)} = \frac{1}{1+j10} = \frac{1}{\sqrt{1+10^2}} = 0{,}099$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{10}{1}\right)} = \frac{0^o}{84{,}29^o} = 0^o - 84{,}29^o = -84{,}29^o$$

$$Vo = (0{,}099).100\sin(10^4.t + 30^o + \theta) = 9{,}9\sin(10^4.t - 54{,}29^o)mV$$

Langkah-langkah perencanaan LPF -20 dB/decade

1. Pilihlah frekuensi *cut-off* ω_C atau *fc*,
2. Pilihlah R antara 10 K – 100 K,
3. Hitunglah C dengan rumus $C = \frac{1}{\omega_C . R}$,
4. Pilihlah Rf = R.

Contoh 6.2

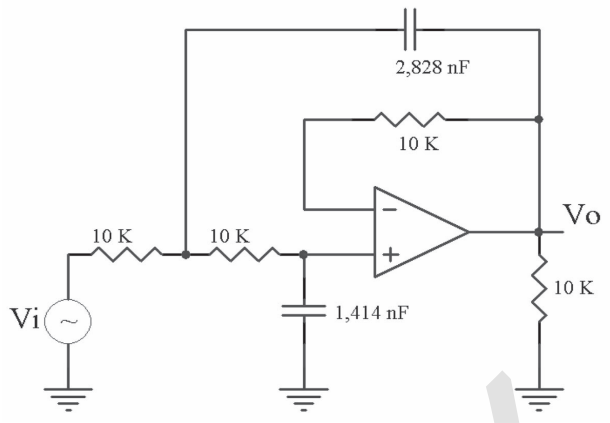
Rancanglah LPF -20 dB/dec dengan ω_C = 50krad/det!

Penyelesaian:

1. Dipilih frekuensi *cut-off* ω_C = 50krad/det.
2. Dipilih R = 10 K.
3. Dihitung C yaitu $C = \frac{1}{\omega_C . R} = \frac{1}{2.10^{-9}.10^4} = 2.10^{-9}F = 2nF$.
4. Pilihlah Rf = 10 K.

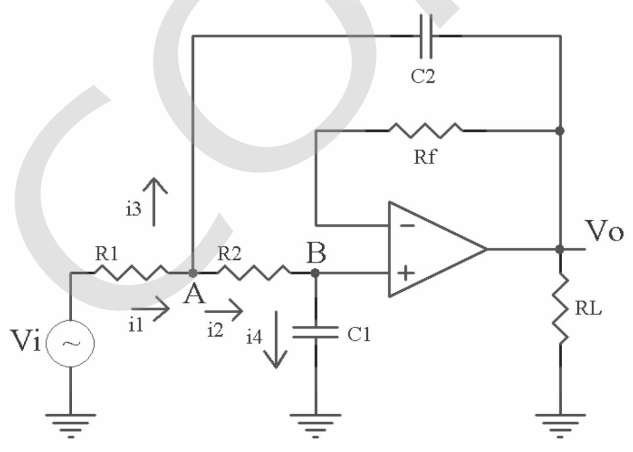
   Rangkaiannya seperti berikut,

COPY



6.1.2 LPF -40 dB/dec

Rangkaian LPF-40 dB/dec sama seperti rangkaian LPF -20 dB/dec, tetapi grafik di atas frekuensi *cut-off* lebih curam. Op-amp berfungsi sebagai *buffer* (penyangga), sedangkan rangkaian depannya adalah sebuah filter pasif dari rangkaian R-C, tetapi jumlah R ada dua dan jumlah C ada dua juga. Gambar rangkaian LPF -40 dB/dec seperti berikut,



Gambar 6.2 *Rangkaian LPF -40 dB/decade*

Analisis dari rangkaian filter LPF -40 dB/dec sebagai berikut. Tegangan *output* (Vo) diumpanbalikkan pada titik masukan negatif (*negative input*) melalui Rf dan pada titik A melalui C2. Karena op-amp ideal maka tegangan selisih (*differential input*) sama dengan nol sehingga tegangan pada masukan negatif sama dengan tegangan pada masukan positif yang merupakan tegangan *output* Vo. Hukum Kirchoff I (hukum arus) pada titik A dan pada titik B adalah

Pada titik A adalah $I1 = I2 + I3$ (6)

Pada titik B adalah $I2 = i + I4 = I4$ (7)

COPY

Tegangan Vo sama dengan tegangan VB sehingga

$$I4 = \frac{VB}{1/j\omega.C1} = j\omega.C1.VB = j\omega.C1.Vo \quad (8)$$

$$I2 = \frac{VA - VB}{R2} = \frac{VA - Vo}{R2} \quad (9)$$

$$I2 = I4 = j\omega.C1.Vo$$

$$\frac{VA - Vo}{R2} = j\omega.C1.Vo$$

$$VA = Vo + j\omega.C1.R2.Vo \quad (10)$$

$$I3 = \frac{VA - Vo}{1/j\omega.C2} = (VA - Vo)\,j\omega.C2$$

$$I3 = (Vo + j\omega.C1.R2.Vo - Vo)\,j\omega.C2$$

$$I3 = -\omega^2.C1.C2.R2.Vo \quad (11)$$

$$I1 = \frac{Vi - VA}{R1} \quad (12)$$

$$I1 = I2 + I3$$

$$\frac{Vi - VA}{R1} = j\omega.C1.Vo + \left(-\omega^2.C1.C2.R2.Vo\right)$$

$$Vi = VA + j\omega.C1.R1.Vo - \omega^2.C1.C2.R1.R2.Vo$$

$$Vi = Vo + j\omega.C1.R2.Vo + j\omega.C1.R1.Vo - \omega^2.C1.C2.R1.R2.Vo$$

$$Vi = Vo\left\{1 - \omega^2.C1.C2.R1.R2 + j\omega.C1(R1 + R2)\right\}$$

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1 - \omega^2.C1.C2.R1.R2 + j\omega.C1(R1 + R2)} \quad (13)$$

Pada LPF -40 dB/dec bahwa pada $\omega = \omega_C$ maka nilai penguatan $\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707$ dan sudut phasenya sama dengan -90^o. Supaya menghasilkan nilai sudut phase seperti itu maka nilai sudut pada penyebut pada persamaan (6.13) sama dengan $+90^o$. Supaya menghasilkan sudut $+90^o$ maka nilai $1-\omega_C^2.C1.C2.R1.R2$ atau

$$\omega_C = \frac{1}{\sqrt{C1.C2.R1.R2}}. \quad (14)$$

Apabila nilai resistor dibuat R1 = R2 = R dan nilai kapasitor dibuat C2 = 2.C1 maka

$$\omega_C = \frac{1}{\sqrt{C1.(2C1).R.R}} = \frac{1}{\sqrt{2}C1.R} = \frac{0{,}707}{C1.R} \quad (15)$$

atau nilai $C1 = \frac{0{,}707}{\omega_C.R}$ (16)

Persamaan transfer function $\frac{Vo}{Vi}$ dari persamaan (6.13) sebagai fungsi menjadi:

COPY

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\omega^2.\frac{0,707}{\omega_C.R}.\left(2.\frac{0,707}{\omega_C.R}\right).R.R + j\omega.\left(\frac{0,707}{\omega_C.R}\right)(R+R)}$$

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} \qquad (17)$$

Nilai penguatan $\frac{Vo}{Vi}$ dan sudut phase θ untuk beberapa nilai ω yang berbeda adalah

Tabel 6.2 *Nilai penguatan dan sudut phase LPF -40 dB/dec*

No.	Frekuensi (ω)	Penguatan($\frac{Vo}{Vi}$)	Sudut phase (θ)
1	$0,1\omega_C$	0,9999500037	–8,13°
2	$0,25\omega_C$	0,9980713439	–20,66°
3	$0,5\omega_C$	0,9702338206	–43,31°
4	ω_C	$\frac{1}{\sqrt{2}}$ atau 0,707	–90°
5	$2\omega_C$	0,2425528612	–136,69°
6	$4\omega_C$	0,0623794998	–159,34°
7	$10\omega_C$	0,0099995302	–171,87°

Contoh 6.3

Hitunglah frekuensi cut-off (ω_C) pada Gambar 5.2 apabila nilai R1 = 10K, R2 = 50K, C1 = 10 nF, C2 = 100 nF, Rf = 100K, RL = 10K.

Penyelesaian: Nilai frekuensi *cut-off* (ω_C) dari LPF –40 dB/dec adalah $\omega_C = \frac{1}{\sqrt{C1.C2.R1.R2}}$

$$\omega_C = \frac{1}{\sqrt{10^{-8}.10^{-7}.10^4.5.10^4}} = \frac{1}{\sqrt{5.10^{-7}}} = \frac{1}{10^{-4}.\sqrt{50}} = 1414\text{rad/s}$$

Contoh 6.4

Hitunglah frekuensi *cut-off* (ω_C) pada Gambar 5.2 apabila nilai R1 = R2 = R = 10K, C1 = 10nF, C2 = 2.C1 = 20nF, Rf = 20K, RL = 10K. Apabila $Vi = 100\sin(\omega_C.t + 60^o)mV$, hitunglah Vo pada frekuensi $0,1\omega_C$, $0,25\omega_C$, $0,5\omega_C$, ω_C, $2\omega_C$, $4\omega_C$, $10\omega_C$!

Penyelesaian: Karena nilai R1 = R2 = R dan C2 = 2C1 maka nilai frekuensi *cut-off* (ω_C) dari LPF -40 dB/dec adalah

$$\omega_C = \frac{0,707}{C1.R}$$

$$\omega_C = \frac{0,707}{C1.R} = \frac{0,707}{10^{-8}.10^4} = 7070\text{rad/s} = 7,07\text{Krad/s}$$

COPY

$$\omega_C = \frac{0,707}{C1.R} = \frac{0,707}{10^{-8}.10^4} = 7070\text{rad/s} = 7,07\text{Krad/s}$$

Untuk $\omega = 0,1\omega_C = 707$ rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{0,1\omega_C}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}\left(\frac{0,1\omega_C}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-0,01+j0,1414}$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{0,99^2+0,1414^2}} = \frac{1}{\sqrt{0,9801+0,02}} = 0,999$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{0,1414}{0,99}\right)} = \frac{0^o}{8,13^o} = 0^o - 8,13^o = -8,13^o$$

$$Vo = (0,999).100\sin(707.t + 60^o + \theta) = 99,9\sin(707.t + 51,87^o)mV$$

Untuk $\omega = 0,25\omega_C = 1767,5$ rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{0,25\omega_C}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}\left(\frac{0,25\omega_C}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{0,9375+j0,3535}$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{0,9375^2+0,3535^2}} = \frac{1}{\sqrt{0,8789+0,125}} = 0,998$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{0,3535}{0,9375}\right)} = \frac{0^o}{20,66^o} = 0^o - 20,66^o = -20,66^o$$

$$Vo = (0,998).100\sin(1667,5.t + 60^o + \theta) = 99,8\sin(1767,5.t + 39,34^o)mV$$

Untuk $\omega = 0,5\omega_C = 3535$ rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{0,5\omega_C}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}\left(\frac{0,5\omega_C}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-0,25+j0,707}$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{0,75^2+0,707^2}} = \frac{1}{\sqrt{0,5625+0,4998}} = 0,97$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{0,707}{0,75}\right)} = \frac{0^o}{43,31^o} = 0^o - 43,31^o = -43,31^o$$

$$Vo = (0,97).100\sin(3535.t + 60^o + \theta) = 97\sin(3535.t + 16,69^o)mV$$

Untuk $\omega = \omega_C$,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}\left(\frac{\omega_C}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-1+j\sqrt{2}} = \frac{1}{j\sqrt{2}}$$

COPY

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{0^2+\sqrt{2}^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{\sqrt{2}}{0}\right)} = \frac{0^o}{90^o} = 0^o - 90^o = -90^o$$

$$Vo = (0{,}707).100\sin(7070.t + 60^o + \theta) = 70{,}7\sin(7070.t + 30^o)mV$$

Untuk $\omega = 2\omega_C$,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{2\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}\left(\frac{2\omega_C}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{-3+j2{,}828}$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{(-3)^2+2{,}828^2}} = \frac{1}{\sqrt{9+7{,}9976}} = 0{,}24$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{2{,}828}{-3}\right)} = \frac{0^o}{136{,}69^o} = 0^o - 136{,}69^o = -136{,}69^o$$

$$Vo = (0{,}24).100\sin(14140.t + 60^o + \theta) = 24\sin(14140.t + 76{,}69^o)mV$$

Untuk $\omega = 4\omega_C = 28280$rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{4\omega_C}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}\left(\frac{4\omega_C}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-16+j5{,}656}$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{(-15)^2+5{,}656^2}} = \frac{1}{\sqrt{225+31{,}99}} = 0{,}06$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{5{,}656}{-15}\right)} = \frac{0^o}{159{,}34^o} = 0^o - 159{,}34^o = -159{,}34^o$$

$$Vo = (0{,}06).100\sin(28280.t + 60^o + \theta) = 6\sin(28280.t + 99{,}34^o)mV$$

Untuk $\omega = 10\omega_C = 70700$rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{10\omega_C}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}\left(\frac{10\omega_C}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-100+j1{,}414}$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{(-99)^2+14{,}14^2}} = \frac{1}{\sqrt{9801+199{,}9396}} = 0{,}009$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{14{,}14}{-99}\right)} = \frac{0^o}{171{,}87^o} = 0^o - 171{,}87^o = -171{,}87^o$$

$$Vo = (0{,}009).100\sin(70700.t + 60^o + \theta) = 0{,}9\sin(70700.t + 111{,}87^o)mV$$

COPY

Tahap perencanaan LPF -40 dB/decade

1. Pilihlah frekuensi *cut-off* ω_C atau f_C,
2. Pilihlah R1 = R2 = R yaitu antara 10 K – 100 K,
3. Hitunglah C1 dengan rumus $C1 = \frac{0,707}{\omega_C.R}$,
4. Pilihlah C2 = 2.C1,
5. Pilihlah Rf = 2R.

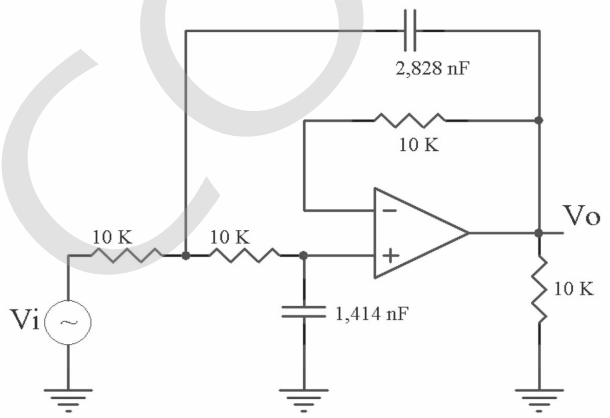
Contoh 6.5

Rancanglah LPF -40 dB/dec dengan $\omega_C = 50krad/det$!

Penyelesaian:

1. Dipilih frekuensi cut-off $\omega_C = 50krad/det$
2. Dipilih R1 = R2 = R = 10 K
3. Dihitung C1 yaitu $C1 = \frac{0,707}{\omega_C.R} = \frac{0,707}{5.10^4.10^4} = 1,414.10^{-9}F = 1,414nF$
4. Pilihlah C2 = 2.C1 yaitu C2 = 2,828 nF
5. Pilihlah Rf = 20 K.

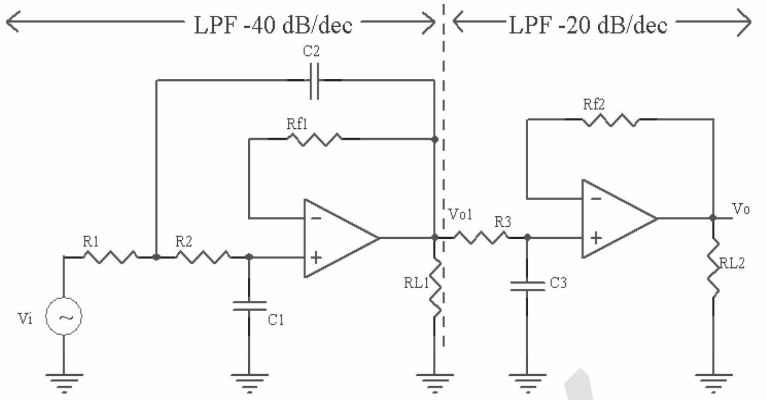
   Gambar rangkaian LPF -40 dB/dec dengan $\omega_C = 50krad/det$.



6.1.3 LPF -60 dB/dec

Rangkaian LPF-60 dB/dec mempunyai respons frekuensi sama seperti rangkaian LPF -20 dB/dec maupun LPF -40 dB/dec, tetapi grafiknya di atas frekuensi *cut-off* lebih curam lagi dan lebih mendekati karakteristik idealnya. Rangkaian filter LPF -60 dB/dec merupakan dua buah filter LPF yang disusun bertahap dan merupakan gabungan antara LPF -40 dB/dec dengan LPF -20 dB/dec. Gambar rangkaian LPF -60 dB/dec seperti berikut,

COPY



Gambar 6.3 *Rangkaian LPF -60 dB/decade*

Analisis dari rangkaian filter LPF -60 dB/dec bahwa penguatan keseluruhan dari rangkaian adalah

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{Vo1}{Vi} \times \frac{Vo}{Vo1} \qquad (18)$$

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\omega^2 C1.C2.R1.R2 + j\omega.C1(R1+R2)} \times \frac{1}{1+j\omega.C3.R3}$$

Pada LPF -60 dB/dec bahwa pada frekuensi $\omega = \omega_C$ maka nilai penguatan $\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707$ dan sudut phasenya sebesar -135^o. Apabila nilai R1 = R2 = R3 = R, C1 = 0,5.C3, C2 = 2.C3 maka besarnya frekuensi *cut-off*

$$\omega = \frac{1}{C3.R} \qquad (19)$$

Persamaan (6.18) atau *transfer function* yang merupakan fungsi dari menjadi:

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1+j\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2} \qquad (20)$$

w

Nilai penguatan $\left|\frac{Vo}{Vi}\right|$ dan sudut phase θ untuk beberapa nilai ω yang berbeda adalah

Tabel 6.3 *Nilai penguatan dan sudut phase LPF -60 dB/dec*

No.	Frekuensi (ω)	Penguatan ($\left\|\frac{Vo}{Vi}\right\|$) LPF-20 dB/dec	Sudut phase (θ) LPF-20 dB/dec	Penguatan ($\left\|\frac{Vo}{Vi}\right\|$) LPF-40 dB/dec	Sudut phase (θ) LPF-40 dB/dec	Penguatan ($\left\|\frac{Vo}{Vi}\right\|$) LPF-60 dB/dec	Sudut phase (θ) LPF-60 dB/dec
1	$0{,}1\omega_C$	0,9950371902	$-5{,}71^o$	0,9999500037	$-8{,}13^o$	0,9949874420	$-13{,}84^o$
2	$0{,}25\omega_C$	0,9701425001	$-14{,}04^o$	0,9980713439	$-20{,}66^o$	0,9682714288	$-34{,}7^o$
3	$0{,}5\omega_C$	0,8944271909	$-26{,}56^o$	0,9702338206	$-43{,}31^o$	0,8678035107	$-69{,}87^o$
4	ω_C	$\frac{1}{\sqrt{2}}$ atau0,707	-45^o	$\frac{1}{\sqrt{2}}$ atau0,707	-90^o	$\frac{1}{\sqrt{2}}$ atau0,707	-135^o
5	$2\omega_C$	0,4472135955	$-63{,}43^o$	0,2425528612	$-136{,}69^o$	0,1084729371	$-200{,}12^o$

COPY

6	$4\omega_C$	0,2425356250	$-75,96^o$	0,0623794998	$-159,34^o$	0,0151292509	$-235,3^o$
7	$10\omega_C$	0,0995037190	$-84,29^o$	0,0099995302	$-171,87^o$	0,0009949904	$-256,16^o$

Contoh 6.6

Hitunglah frekuensi *cut-off* (ω_C) pada Gambar 5.3 apabila nilai R1 = R2 = R3 = R = 10K, C3 = 20 nF, C1 = 0,5. C3 = 10 nF, C2 = 2.C3 = 40 nF, Rf = 10K, RL = 10K!
Apabila $Vi = 100\sin(\omega.t + 60^o)mV$, hitunglah Vo pada frekuensi $0,1\omega_C$, $0,25\omega_C$, $0,5\omega_C$, ω_C, $2\omega_C$, $4\omega_C$, $10\omega_C$!

Penyelesaian:

Karena nilai R1 = R2 = R3 = R = 10 K dan C3 = 20 nF, C1 = 0,5C3, C2 = 2C3 maka nilai frekuensi *cut-off* (ω_C) dari LPF -60 dB/dec adalah $\omega C = \dfrac{1}{C3.R}$

$$\omega = \frac{1}{2.10^{-8}.10^4} = 5000\text{rad/s} = 5\text{Krad/s}$$

Untuk $\omega = 0,1\omega_C = 500$rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1+j\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{0,1\omega}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{0,1\omega_C}{\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1+j\left(\frac{0,1\omega_C}{\omega_C}\right)}$$

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-(0,1)^2 + j\sqrt{2}.(0,1)} \times \frac{1}{1+j(0,1)} =$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{0,99^2 + 0,1414^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1^2 + 0,1^2}} = 0,995$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{0,1414}{0,99}\right) + tg^{-1}\left(\frac{0,1}{1}\right)} = \frac{0^o}{8,13^o + 5,71^o} = 0^o - 13,84^o = -13,84^o$$

$$Vo = (0,995).100\sin(500.t + 60^o + \theta) = 99,5\sin(500.t + 46,16^o)mV$$

Untuk $\omega = 0,25\omega_C = 1250$rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1+j\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{0,25\omega_C}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{0,25\omega_C}{\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1+j\left(\frac{0,25\omega_C}{\omega_C}\right)}$$

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-(0,25)^2 + j\sqrt{2}.(0,25)} \times \frac{1}{1+j(0,25)} =$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{0,9375^2 + 0,3535^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1^2 + 0,25^2}} = 0,968$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{0,3535}{0,9375}\right) + tg^{-1}\left(\frac{0,25}{1}\right)} = \frac{0^o}{20,66^o + 14,04^o} = 0^o - 34,7^o = -34,76^o$$

$$Vo = (0,968).100\sin(1250.t + 60^o + \theta) = 96,8\sin(1250.t + 25,24^o)mV$$

COPY

Untuk $\omega = 0{,}5\omega_C = 2500$rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1+j\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{0{,}5\omega_C}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{0{,}5\omega_C}{\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1+j\left(\frac{0{,}5\omega_C}{\omega_C}\right)}$$

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-(0{,}5)^2 + j\sqrt{2}.(0{,}5)} \times \frac{1}{1+j(0{,}5)} =$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{0{,}75^2 + 0{,}707^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1^2 + 0{,}5^2}} = 0{,}868$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{0{,}707}{0{,}75}\right) + tg^{-1}\left(\frac{0{,}5}{1}\right)} = \frac{0^o}{43{,}31^o + 26{,}56^o} = 0^o - 69{,}87^o = -69{,}87^o$$

$$Vo = (0{,}868).100\sin(2500.t + 60^o + \theta) = 86{,}8\sin(2500.t + 9{,}87^o)mV$$

Untuk $\omega = \omega_C = 5000$rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1+j\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega_C}{\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1+j\left(\frac{\omega_C}{\omega_C}\right)}$$

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-(1)^2 + j\sqrt{2}.(1)} \times \frac{1}{1+j(1)} =$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{0^2 + \sqrt{2}^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1^2 + 1^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}5$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{\sqrt{2}}{0}\right) + tg^{-1}\left(\frac{0{,}5}{1}\right)} = \frac{0^o}{90^o + 45^o} = 0^o - 135^o = -135^o$$

$$Vo = (0{,}5).100\sin(5000.t + 60^o + \theta) = 50\sin(5000.t - 75^o)mV$$

Untuk $\omega = 2\omega_C = 10.000$rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1+j\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{2\omega_C}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{2\omega_C}{\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1+j\left(\frac{2\omega_C}{\omega_C}\right)}$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{(-3)^2 + 2{,}828^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1^2 + 2^2}} = 0{,}108$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{2{,}828}{-3}\right) + tg^{-1}\left(\frac{2}{1}\right)} = \frac{0^o}{136{,}69^o + 63{,}43^o} = 0^o - 200{,}12^o = -200{,}12^o$$

$$Vo = (0{,}108).100\sin(10000.t + 60^o + \theta) = 10{,}8\sin(10000.t - 140{,}12^o)mV$$

COPY

Untuk $\omega = 4\omega_C = 20.000$rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1+j\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{4\omega_C}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{4\omega_C}{\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1+j\left(\frac{4\omega_C}{\omega_C}\right)}$$

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-(4)^2 + j\sqrt{2}.(4)} \times \frac{1}{1+j(4)}$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{(-15)^2 + 5{,}656^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1^2+4^2}} = 0{,}015$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{5{,}656}{-15}\right) + tg^{-1}\left(\frac{4}{1}\right)} = \frac{0^o}{159{,}34^o + 75{,}96^o} = 0^o - 235{,}3^o = -235{,}3^o$$

$Vo = (0{,}015).100\sin(20000.t + 60^o + \theta) = 1{,}5\sin(20000.t - 175{,}3^o)mV$

Untuk $\omega = 10\omega_C = 50000$rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1+j\left(\frac{\omega}{\omega_C}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{10\omega_C}{\omega_C}\right)^2 + j\sqrt{2}.\left(\frac{10\omega_C}{\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1+j\left(\frac{10\omega_C}{\omega_C}\right)}$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{(-99)^2 + 14{,}14^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1^2+10^2}} = 0{,}001$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{14{,}14}{-99}\right) + tg^{-1}\left(\frac{10}{1}\right)} = \frac{0^o}{171{,}87^o + 84{,}29^o} = 0^o - 256{,}16^o = -256{,}16^o$$

$Vo = (0{,}001).100\sin(50000.t + 60^o + \theta) = 0{,}1\sin(50000.t - 196{,}16^o)mV$

Tahap perencanaan LPF -60 db/decade

1. Pilihlah frekuensi cut-off ω_C atau *fC*,
2. Pilihlah R1 = R2 = R3 = R antara 10 K – 100 K,
3. Hitunglah C3 dengan rumus $C3 = \frac{1}{\omega C.R}$,
4. Pilihlah C1 = 2 C3,
5. Pilihlah C2 = 0,5 .C3,
6. Pilihlah Rf1 = Rf2 = R.

Contoh 6.7

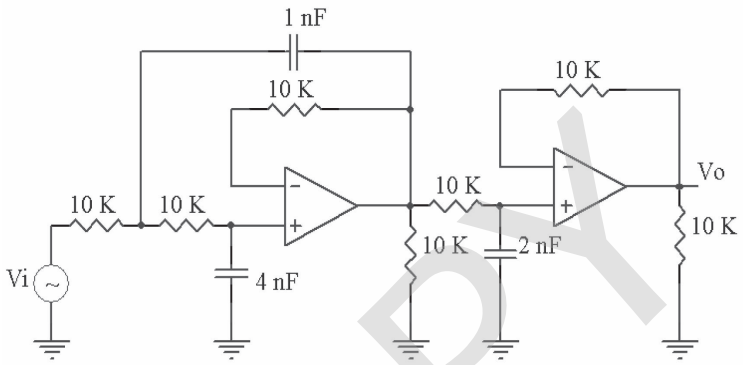
Rancanglah LPF-60dB/dec dengan $\omega_C = 50$*krad/det*!

Penyelesaian:

1. Dipilih frekuensi *cut-off* $\omega_C = 50$*krad/det*
2. Dipilih R1 = R2 = R3 = 10 K

COPY

3. Dihitung C3 yaitu $C3 = \frac{1}{\omega_C.R} = \frac{1}{5.10^4.10^4} = 2.10^{-9}F = 2nF$
4. Pilihlah C1 = 2. C3 yaitu C1 = 4 nF
5. Pilihlah C2 = 0,5 . C3 = 1 nF
6. Pilihlah Rf1 = Rf2 = R = 10 K.
   Rangkaian LPF -60 dB/dec dengan $\omega_C = 50krad/det$.



6.2 HPF (*High Pass Filter*)

HPF (*High pass filter*) adalah filter yang melewatkan sinyal dengan frekuensi di atas frekuensi tertentu atau frekuensi *cut-off* (ω_C) dan membuang sinyal dengan frekuensi di bawah frekuensi *cut-off* (ω_C). Beberapa jenis HPF adalah HPF +20 dB/dec, HPF +40 dB/dec, HPF +60 dB/dec.

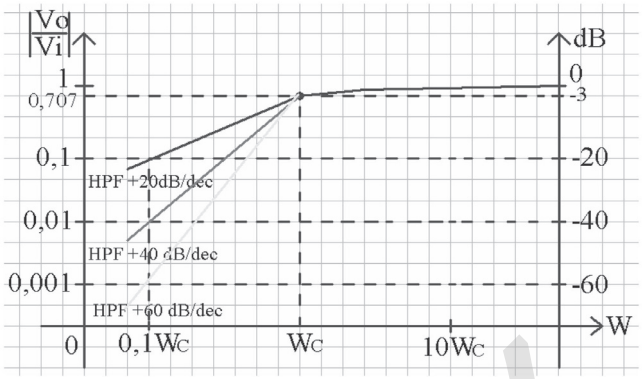
HPF +20 dB/dec adalah HPF yang penguatannya naik sebesar +20 dB apabila frekuensinya naik sebesar 10 kali atau satu decade. Pada saat frekuensi sinyal *input* sama dengan frekuensi *cut-off* (ω_C) maka penguatannya sama dengan $\frac{1}{\sqrt{2}}$ atau 0,707 dan sudut phasenya sebesar $+45^o$.

HPF +40 dB/dec adalah HPF yang penguatannya naik sebesar +40 dB apabila frekuensinya naik sebesar 10 kali atau satu decade. Pada saat frekuensi sinyal *input* sama dengan frekuensi *cut-off* (ω_C) maka penguatannya sama dengan $\frac{1}{\sqrt{2}}$ atau 0,707 dan sudut phasenya sebesar $+90^o$.

HPF +60 dB/dec adalah HPF yang penguatannya naik sebesar +60 dB apabila frekuensinya naik sebesar 10 kali atau satu decade. Pada saat frekuensi sinyal *input* sama dengan frekuensi *cut-off* (ω_C) maka penguatannya sama dengan $\frac{1}{\sqrt{2}}$ atau 0,707 dan sudut phasenya sebesar $+135^o$.

COPY

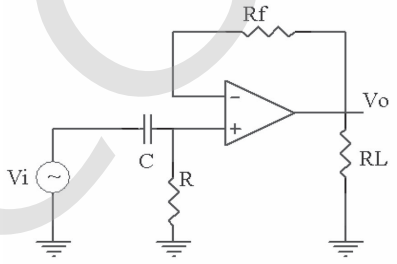
Grafik Frekuensi respons (tanggapan frekuensi) untuk HPF



Dari grafik respons frekuensi pada HPF, semakin besar nilai kenaikannya maka grafik di bawah frekuensi *cut-off* (ω_C) menjadi semakin curam atau semakin mendekati HPF yang ideal.

6.2.1 HPF +20 dB/dec

Rangkaian HPF merupakan kebalikan dari LPF. Rangkaian pada HPF sama dengan rangkaian LPF, tetapi posisi R dan C bertukar tempat. HPF +20 dB/dec sama dengan LPF -20 dB/dec, tetapi posisi R ditempati C dan posisi C ditempati R. Op-amp berfungsi sebagai *buffer* (penyangga), sedangkan rangkaian depannya adalah sebuah filter pasif dari rangkaian C-R. Apabila digabung dengan rangkaian op-amp sebagai rangkaian *buffer* maka impedansi *output*-nya menjadi tetap dan nilainya kecil karena sama dengan impedansi dari op-amp.



Gambar 6.4 *Rangkaian HPF +20 dB/dec*

Analisis dari rangkaian filter HPF +20 dB/dec sebagai berikut. Tegangan *output* (Vo) diumpanbalikkan pada titik masukan negatif (*negative input*). Karena op-amp ideal maka tegangan selisih (*differential input*) sama dengan nol sehingga tegangan pada masukan negatif sama dengan tegangan pada masukan positif yang merupakan tegangan akibat pembagian tegangan sinyal *input* oleh impedansi C dan resistor R dan sama dengan Vo.

$$V_o = \frac{R}{Z_C + R}.Vi \qquad (21)$$

$$V_o = \frac{R}{\frac{1}{j\omega.C} + R}.Vi \qquad (22)$$

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1+\frac{1}{j\omega.C.R}} \qquad (23)$$

Pada HPF +20 dB/dec bahwa pada $\omega = \omega_C$ maka nilai $\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707$ dan sudut phasenya . Supaya menghasilkan nilai seperti itu maka nilai pada penyebut pada persamaan (6.23) adalah $\left|1+\frac{1}{j\omega.C.R}\right| = \sqrt{2}$ sehingga

$$\frac{1}{\omega_C.C.R} = 1 \text{ atau } \omega_C = \frac{1}{C.R} \text{ atau } C = \frac{1}{\omega_C.R} \qquad (24)$$

Persamaan (6.23) atau *transfer function* $\left|\frac{Vo}{Vi}\right|$ yang merupakan fungsi dari menjadi:

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1+\frac{1}{j\omega.C.R}} = \frac{1}{1+\left(\frac{\omega_C}{j\omega}\right)} = \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} \qquad (25)$$

Nilai penguatan $\left|\frac{Vo}{Vi}\right|$ dan sudut phase θ untuk beberapa nilai ω yang berbeda adalah

Tabel 6.4 *Nilai penguatan dan sudut phase HPF +20 dB/dec*

No.	Frekuensi (ω)	Penguatan ($\left\|\frac{Vo}{Vi}\right\|$)	Sudut phase (θ)
1	$0{,}1\omega_C$	0,0995037190	+84,29°
2	$0{,}25\omega_C$	0,2425356250	+75,96°
3	$0{,}5\omega_C$	0,4472135955	+63,43°
4	ωC	$\frac{1}{\sqrt{2}}$ atau 0,707	+45°
5	$2\omega_C$	0,8944271909	+26,56°
6	$4\omega_C$	0,9701425001	+14,04°
7	$10\omega_C$	0,9950371902	+5,71°

Contoh 6.8

Hitunglah frekuensi *cut-off* (ω_C) pada Gambar 5.4 apabila nilai R = 10K, C = 10μF, Rf = 100 K, RL = 10 K. Apabila $Vi = 100\sin(\omega.t+60^o)mV$, hitunglah Vo pada frekuensi 1 rad/s, 5 rad/s, 10 Krad/s, 20 rad/s, 10 Krad/s.

Penyelesaian:

Nilai frekuensi *cut-off* (ω_C) dari HPF +20 dB/dec adalah $\omega_C = \frac{1}{C.R}$

$$\omega_C = \frac{1}{10^{-5}.10^4} = 10\text{rad/s}$$

COPY

Untuk ω = 1rad/s,

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} = \frac{1}{1-j\left(\frac{10}{1}\right)} = \frac{1}{1-j10} = \frac{1}{\sqrt{1^2+(-10)^2}} = 0{,}099$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{-10}{1}\right)} = \frac{0^o}{-84{,}29^o} = 0^o + 84{,}29^o = +84{,}29^o$$

$$Vo = (0{,}099).100\sin(1.t + 30^o + \theta) = 9{,}9\sin(1.t + 114{,}29^o)mV$$

Untuk ω = 5rad/s,

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} = \frac{1}{1-j\left(\frac{10}{5}\right)} = \frac{1}{1-j2} = \frac{1}{\sqrt{1^2+(-2)^2}} = 0{,}447$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{-2}{1}\right)} = \frac{0^o}{-63{,}43^o} = 0^o + 63{,}43^o = +63{,}43^o$$

$$Vo = (0{,}447).100\sin(5.t + 30^o + \theta) = 44{,}7\sin(5.t + 93{,}43^o)mV$$

Untuk ω = 10rad/s,

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} = \frac{1}{1-j\left(\frac{10}{10}\right)} = \frac{1}{1-j1} = \frac{1}{\sqrt{1^2+(-1)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{-1}{1}\right)} = \frac{0^o}{-45^o} = 0^o + 45^o = +45^o$$

$$Vo = (0{,}707).100\sin(10.t + 30^o + \theta) = 70{,}7\sin(10.t + 75^o)mV$$

Untuk ω = 20rad/s,

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} = \frac{1}{1-j\left(\frac{10}{20}\right)} = \frac{1}{1-j0{,}5} = \frac{1}{\sqrt{1^2+(-0{,}5)^2}} = 0{,}894$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{-0{,}5}{1}\right)} = \frac{0^o}{-26{,}56^o} = 0^o + 26{,}56^o = +26{,}56^o$$

$$Vo = (0{,}894).100\sin(20.t + 30^o + \theta) = 89{,}4\sin(20.t + 56{,}56^o)mV$$

Untuk ω = 100rad/s,

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} = \frac{1}{1-j\left(\frac{10}{100}\right)} = \frac{1}{1-j0{,}1} = \frac{1}{\sqrt{1^2+(-0{,}1)^2}} = 0{,}995$$

COPY

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{-0,1}{1}\right)} = \frac{0^o}{-5,71^o} = 0^o + 5,71^o = +5,71^o$$

$Vo = (0,995).100\sin(100.t + 30^o + \theta) = 99,5\sin(100.t + 35,71^o)mV$

Langkah-langkah Perencanaan HPF +20 db/decade

1. Pilihlah frekuensi *cut-off* ω_C atau *fC*.
2. Pilihlah C antara 0,001 – 0,1 uF.
3. Hitunglah R dengan rumus $R = \frac{1}{\omega_C.C}$
4. Pilihlah Rf = R.

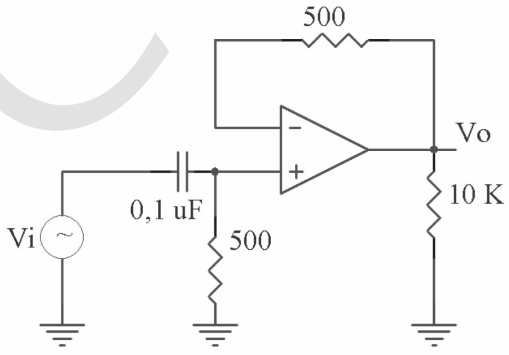
Contoh 6.9

Rancanglah HPF +20 dB/dec dengan ω_C = 20*krad/det*!

Penyelesaian:

1. Dipilih frekuensi *cut-off* ω_C = 20*krad/det*
2. Dipilih C = 0,1 uF
3. Dihitung R yaitu $R = \frac{1}{\omega_C.C} = \frac{1}{2.10^4.10^{-7}} = 500\Omega$
4. Pilihlah Rf = 0,5 K

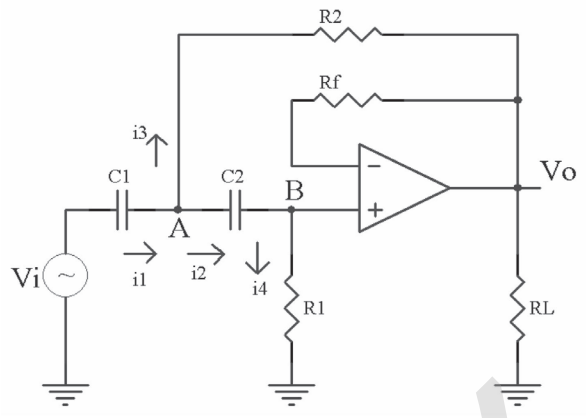
   Rangkaiannya sebagai berikut:



6.2.2 HPF +40 dB/dec

Rangkaian HPF +40 dB/dec sama seperti rangkaian LPF +20 dB/dec, tetapi grafik di bawah frekuensi *cut-off* lebih curam. Op-amp berfungsi sebagai *buffer* (penyangga), sedangkan rangkaian depannya adalah sebuah filter pasif dari rangkaian C-R, tetapi jumlah C ada dua dan jumlah R ada dua juga. Gambar rangkaian HPF +40 dB/dec seperti berikut,

COPY



Gambar 6.5 *Rangkaian HPF +40 dB/decade*

Analisis dari rangkaian filter HPF +40 dB/dec sebagai berikut. Tegangan *output* (Vo) diumpanbalikkan pada titik masukan negatif (*negatif input*) melalui Rf dan pada titik A melalui R2. Karena op-amp ideal maka tegangan selisih (*differential input Ed*) sama dengan nol sehingga tegangan pada masukan negatif sama dengan tegangan pada masukan positif yang merupakan tegangan output Vo. Hukum Kirchoff I (hukum arus) pada titik A dan pada titik B adalah,

Pada titik A adalah $I1 = I2 + I3$ (26)

Pada titik B adalah $I1 = i + I4 = I4$ (27)

Tegangan Vo sama dengan tegangan VB sehingga

$$I4 = \frac{VB}{R1} = \frac{Vo}{R1} \tag{28}$$

$$I2 = \frac{VA - VB}{\frac{1}{j\omega.C2}} = (VA - Vo).j\omega C2 \tag{29}$$

$$I2 = I4$$

$$(VA - Vo).j\omega.C2 = \frac{Vo}{R1}$$

$$VA = Vo + \frac{Vo}{j\omega.C2.R1} \tag{30}$$

$$I1 = \frac{Vi - VA}{\frac{1}{j\omega.C1}} = (Vi - VA)\, j\omega.C1$$

$$I1 = \left(Vi - Vo - \frac{Vo}{j\omega.C2.R1} \right) j\omega.C1 \tag{31}$$

$$I3 = \frac{VA - Vo}{R2} \tag{32}$$

COPY

$$I1 = I2 + I3$$

$$\left(Vi - Vo - \frac{Vo}{j\omega.C2.R1}\right) j\omega.C1 = (VA - Vo)\, j\omega.C2 + \frac{VA - Vo}{R2}$$

$$\left(Vi - Vo - \frac{Vo}{j\omega.C2.R1}\right) j\omega.C1 = \left(Vo + \frac{Vo}{j\omega.C2.R1} - Vo\right) j\omega.C2 + \frac{Vo + \frac{Vo}{j\omega.C2.R1} - Vo}{R2}$$

$$\left(Vi - Vo - \frac{Vo}{j\omega.C2.R1}\right) j\omega.C1 = \frac{Vo}{R1} + \frac{Vo}{j\omega.C2.R1.R2}$$

$$\left(Vi - Vo - \frac{Vo}{j\omega.C2.R1}\right) = \frac{Vo}{j\omega.C1.R1} + \frac{Vo}{-\omega^2.C1.C2.R1.R2}$$

$$Vi = Vo + \frac{Vo}{j\omega.C2.R1} + \frac{Vo}{j\omega.C1.R1} - \frac{Vo}{\omega^2.C1.C2.R1.R2}$$

$$Vi = Vo\left\{1 - \frac{1}{\omega^2.C1.C2.R1.R2} + \frac{1}{j\omega.R1}\left(\frac{1}{C1} + \frac{1}{C2}\right)\right\}$$

$$\frac{Vo}{V1} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\omega^2.C1.C2.R1.R2} - j\frac{1}{\omega.R1}\left(\frac{1}{C1} + \frac{1}{C2}\right)} \qquad (33)$$

Pada HPF $+40$ dB/dec bahwa pada $\omega = \omega_C$ maka nilai penguatan $\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707$ dan sudut phasenya sama dengan $+90^o$. Supaya menghasilkan nilai sudut phase seperti itu maka nilai sudut pada penyebut pada persamaan (6.33) sama dengan -90^o. Supaya menghasilkan sudut -90^o maka nilai

$$1 - \frac{1}{\omega_C{}^2.C1.C2.R1.R2} = 0 \text{ atau } \omega_C = -\frac{1}{\sqrt{C1.C2.R1.R2}} \qquad (34)$$

Apabila nilai kapasitor dibuat C1 = C2 = C dan nilai resistor dibuat $R2 = \frac{1}{2}R1$ maka

$$\omega_C = \frac{1}{\sqrt{C.C.R1.\frac{1}{2}R1}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2}}C.R1} = \frac{\sqrt{2}}{C.R1} = \frac{1{,}414}{C.R1} \qquad (35)$$

atau nilai $R1 = \frac{\sqrt{2}}{\omega_C.C} = \frac{1{,}414}{\omega_C.C}$ (36)

Persamaan *transfer function* $\left|\frac{Vo}{Vi}\right|$ dari persamaan (6.33) sebagai fungsi ω_C menjadi:

$$\frac{Vo}{V1} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\omega^2.C.C.\frac{\sqrt{2}}{\omega_C.C}.\frac{1}{2}.\frac{\sqrt{2}}{\omega_C.C}} - j\frac{1}{\omega.\frac{\sqrt{2}}{\omega_C.C}}\left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C}\right)}$$

$$\frac{Vo}{V1} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_C}{\omega}\right) - j\sqrt{2}\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} \qquad (37)$$

COPY

Nilai penguatan $\left|\frac{Vo}{Vi}\right|$ dan sudut phase θ untuk beberapa nilai ω yang berbeda adalah

Tabel 6.5 *Nilai penguatan dan sudut phase HPF +40 dB/dec*

No.	Frekuensi (ω)	Penguatan ($\left\|\frac{Vo}{Vi}\right\|$)	Sudut Phase (θ)
1	$0,1\omega_C$	0,0099995302	$+171,87^o$
2	$0,25\omega_C$	0,0623794998	$+159,34^o$
3	$0,5\omega_C$	0,2425528612	$+136,69^o$
4	ω_C	$\frac{1}{\sqrt{2}}$ atau 0,707	$+90^o$
5	$2\omega_C$	0,9702338206	$+43,31^o$
6	$4\omega_C$	0,9980713439	$+20,66^o$
7	$10\omega_C$	0,9999500037	$+8,13^o$

Contoh 6.10

Hitunglah frekuensi *cut-off* (ω_C) pada Gambar 5.5 apabila nilai R1 = 10K, R2 = 100K, C1 = 10 nF, C2 = 100 nF, Rf = 100K, RL = 10K!

Penyelesaian: Nilai frekuensi *cut-off* (ω_C) dari LPF +40 dB/dec adalah $\omega_C = \frac{1}{\sqrt{C1.C2.R1.R2}}$

$$\omega_C = \frac{1}{\sqrt{10^{-8}.10^{-7}.10^{4}.10^{5}}} = \frac{1}{\sqrt{10^{-6}}} = \frac{1}{10^{-3}} = 1000\text{rad/s}$$

Contoh 6.11

Hitunglah frekuensi *cut-off* (ω_C) pada Gambar 5.5 apabila nilai C1 = C2 = C = 100 nF, R1 = 10 K, R2 = 0,5R1 = 5 K, Rf = 10K, RL = 10K. Apabila $Vi = 100\sin(\omega.t + 60^o)mV$, hitunglah Vo pada frekuensi $0,1\omega_C$, $0,25\omega_C$, $0,5\omega_C$, ω_C, $2\omega_C$, $4\omega_C$, $10\omega_C$.

Penyelesaian: Karena nilai C1 = C2 = C dan R2 = 0,5R1 maka nilai frekuensi *cut-off* (ω_C) dari HPF +40 dB/dec adalah $\omega_C = \frac{1,414}{C.R1}$

$$\omega_C = \frac{1,414}{10^{-7}.10^{4}} = 1414\text{rad/s} = 1,414\text{Krad/s}$$

Untuk $\omega = 0,1\omega_C = 141,4$rad/s,

$$\frac{Vo}{V1} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2 - j\sqrt{2}\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{0,1\omega}\right)^2 - j\sqrt{2}\left(\frac{\omega_C}{0,1\omega}\right)} = \frac{1}{1-100-j14,14}$$

$$\left|\frac{Vo}{V1}\right| = \frac{1}{\sqrt{(-2)^2+14,14^2}} = \frac{1}{\sqrt{9801+199,94}} = 0,009$$

COPY

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{-14,14}{-99}\right)} = \frac{0^o}{-171,87^o} = 0^o + 171,87^o = +171,87^o$$

$$Vo = (0,009).100\sin(141,4.t + 60^o + \theta) = 0,9\sin(141,4.t + 231,87^o)mV$$

Untuk $\omega = 0,25\omega_C = 353,5$rad/s,

$$\frac{Vo}{V1} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2 - j\sqrt{2}\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{0,25\omega}\right)^2 - j\sqrt{2}\left(\frac{\omega_C}{0,25\omega}\right)} = \frac{1}{1-16-j5,656}$$

$$\left|\frac{Vo}{V1}\right| = \frac{1}{\sqrt{(-15)^2 + -5,656^2}} = \frac{1}{\sqrt{225+32}} = 0,062$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{-5,656}{-15}\right)} = \frac{0^o}{-159,34^o} = 0^o + 159,34^o = +159,34^o$$

$$Vo = (0,062).100\sin(353,5.t + 60^o + \theta) = 6,2\sin(353,5.t + 219,34^o)mV$$

Untuk $\omega = 0,5\omega_C = 707$rad/s,

$$\frac{Vo}{V1} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2 - j\sqrt{2}\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{0,5\omega}\right)^2 - j\sqrt{2}\left(\frac{\omega_C}{0,5\omega}\right)} = \frac{1}{1-4-j2,828}$$

$$\left|\frac{Vo}{V1}\right| = \frac{1}{\sqrt{(-3)^2 + (-2,828)^2}} = \frac{1}{\sqrt{9+7,998}} = 0,242$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{-2,828}{-3}\right)} = \frac{0^o}{-136,69^o} = 0^o + 136,69^o = +136,69^o$$

$$Vo = (0,242).100\sin(707.t + 60^o + \theta) = 24,2\sin(707.t + 196,69^o)mV$$

Untuk $\omega = \omega_C = 1414$rad/s,

$$\frac{Vo}{V1} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2 - j\sqrt{2}\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2 - j\sqrt{2}\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} = \frac{1}{1-1+j\sqrt{2}} = \frac{1}{-j\sqrt{2}}$$

$$\left|\frac{Vo}{V1}\right| = \frac{1}{\sqrt{0^2 + \left(-\sqrt{2}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{-\sqrt{2}}{0}\right)} = \frac{0^o}{-90^o} = 0^o + 90^o = +90^o$$

$$Vo = (0,707).100\sin(1414.t + 60^o + \theta) = 70,7\sin(1414.t + 150^o)mV$$

COPY

Untuk $\omega = 2\omega_C = 2828$rad/s,

$$\frac{Vo}{V1}=\frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2-j\sqrt{2}\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)}=\frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{2\omega}\right)^2-j\sqrt{2}\left(\frac{\omega_C}{2\omega}\right)}=\frac{1}{1-0{,}25+j0{,}707}$$

$$\left|\frac{Vo}{V1}\right|=\frac{1}{\sqrt{(0{,}75)^2+(-0{,}707)^2}}=\frac{1}{\sqrt{0{,}5625+0{,}4998}}=0{,}97$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{-0{,}707}{0{,}75}\right)} = \frac{0^o}{-43{,}31^o} = 0^o + 43{,}31^o = +43{,}31^o$$

$$Vo=(0{,}97).100\sin(2828.t+60^o+\theta) = 97\sin(2828.t+103{,}31^o)mV$$

Untuk $\omega = 4\omega_C = 5656$rad/s,

$$\frac{Vo}{V1}=\frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2-j\sqrt{2}\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)}=\frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{4\omega}\right)^2-j\sqrt{2}\left(\frac{\omega_C}{4\omega}\right)}=\frac{1}{1-0{,}0625+j0{,}3535}$$

$$\left|\frac{Vo}{V1}\right|=\frac{1}{\sqrt{(0{,}9375)^2+(-0{,}3535)^2}}=\frac{1}{\sqrt{0{,}8789+0{,}125}}=0{,}998$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{-0{,}3535}{0{,}9375}\right)} = \frac{0^o}{-20{,}66^o} = 0^o + 20{,}66^o = +20{,}66^o$$

$$Vo=(0{,}998).100\sin(5656.t+60^o+\theta) = 99{,}8\sin(5656.t+80{,}66^o)mV$$

Untuk $\omega = 10\omega_C = 14140$rad/s,

$$\frac{Vo}{V1}=\frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2-j\sqrt{2}\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)}=\frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{10\omega}\right)^2-j\sqrt{2}\left(\frac{\omega_C}{10\omega}\right)}=\frac{1}{1-0{,}01+j0{,}1414}$$

$$\left|\frac{Vo}{V1}\right|=\frac{1}{\sqrt{(0{,}99)^2+(-0{,}1414)^2}}=\frac{1}{\sqrt{0{,}9801+0{,}02}}=0{,}999$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{-0{,}1414}{0{,}99}\right)} = \frac{0^o}{-8{,}13^o} = 0^o + 8{,}13^o = +8{,}13^o$$

$$Vo=(0{,}999).100\sin(14140.t+60^o+\theta) = 99{,}9\sin(14140.t+68{,}13^o)mV$$

Tahap perencanaan HPF +40 dB/decade

1. Pilihlah frekuensi *cut-off* ω_C atau *Fc*,
2. Pilihlah C1 = C2 = C yaitu antara 0,001 – 0,1 uF,
3. Hitunglah R1 dengan rumus $R1=\frac{1{,}414}{\omega_C.C}$,

COPY

4. Pilihlah R2 = 0,5. R1,
5. Pilihlah Rf = R1.

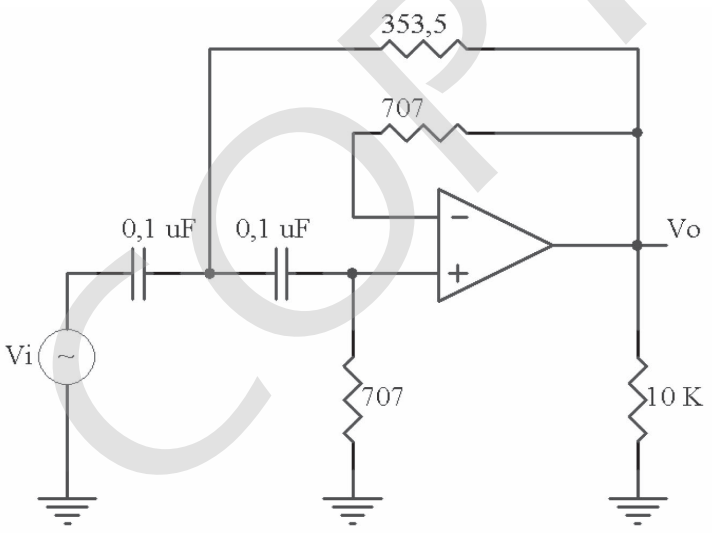
Contoh 6.12

Rancanglah HPF +40dB/dec dengan ω_C = 20*krad/det*!

Penyelesaian:

1. Dipilih frekuensi *cut-off* ω_C = 20*krad/det*
2. Dipilih C1 = C2 = C = 0,1 uF
3. Dihitung R1 yaitu $R1 = \frac{1,414}{\omega_C.C} = \frac{1,414}{2.10^4.10^{-7}} = 707\Omega$
4. Pilihlah R2 = 0,5.R1 yaitu R2 = 353,5
5. Pilihlah Rf = R1 = 707.

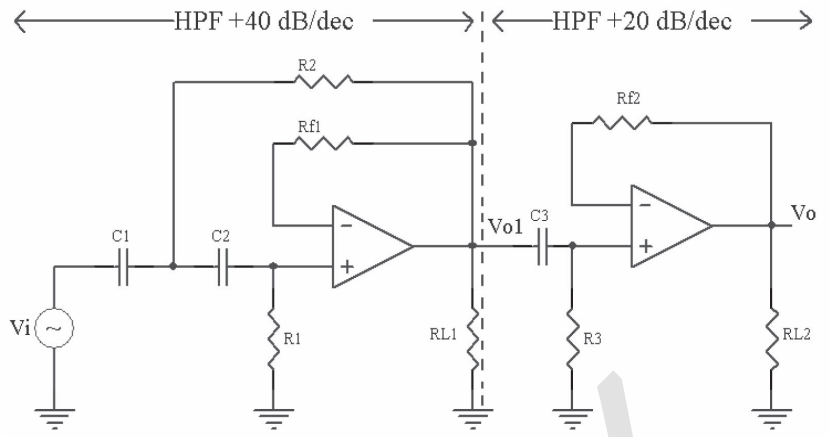
   Rangkaian HPF +40 dB/dec dengan ω_C = 20*krad/det*



COPY

6.2.3 HPF +60 dB/dec

Rangkaian HPF +60 dB/dec mempunyai respons frekuensi sama seperti rangkaian HPF +20 dB/dec maupun HPF +40 dB/dec, tetapi grafiknya untuk di bawah frekuensi *cut-off* lebih curam lagi dan lebih mendekati karakteristik idealnya. Rangkaian filter HPF +60 dB/dec merupakan dua buah filter HPF yang disusun bertahap dan merupakan gabungan antara HPF +40 dB/dec dengan HPF +20 dB/dec. Gambar rangkaian HPF +60 dB/dec seperti berikut,



Gambar 6.6 *Rangkaian HPF +60 dB/decade*

Analisis dari rangkaian filter HPF +60 dB/dec bahwa penguatan keseluruhan dari rangkaian adalah:

$$\frac{Vo}{Vi}=\frac{Vo1}{Vi}\times\frac{Vo}{Vo1} \tag{38}$$

$$\frac{Vo}{Vi}=\frac{1}{1-\frac{1}{\omega^2.C1.C2.R1.R2}-j\frac{1}{\omega.R1}\left(\frac{1}{C1}+\frac{1}{C2}\right)}\times\frac{1}{1-j\frac{1}{\omega.C3.R3}}$$

Pada HPF +60 dB/dec bahwa pada frekuensi $\omega = \omega_C$ maka nilai $\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707$ dan sudut phasenya sebesar $+135^o$. Apabila nilai C1 = C2 = C3 = C, R1 = 2.R3, R2 = 0,5.R3 maka besarnya frekuensi *cut-off*

$$\omega_C=\frac{1}{C.R3} \text{ atau } R3=\frac{1}{\omega_C.C} \tag{39}$$

Persamaan (6.38) atau *transfer function* $\left|\frac{Vo}{Vi}\right|$ yang merupakan fungsi dari ω_C menjadi:

$$\frac{Vo}{Vi}=\frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2-j\sqrt{2}\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)}\times\frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} \tag{40}$$

Nilai penguatan $\left|\frac{Vo}{Vi}\right|$ dan sudut phase θ untuk beberapa nilai ω yang berbeda adalah

Tabel 6.6 *Nilai penguatan dan sudut phase HPF +60 dB/dec*

No.	Frekuensi (ω)	Penguatan HPF + 20 dB/dec	Sudut phase (θ) HPF + 20 dB/dec	Penguatan HPF + 40 dB/dec	Sudut phase (θ) HPF + 40 dB/dec	Penguatan HPF + 60 dB/dec	Sudut phase (θ) HPF + 60 dB/dec
1	$0{,}1\omega_C$	0,0995037190	$+84{,}29^o$	0,0099995302	$+171{,}87^o$	0,0009949904	$+256{,}16^o$
2	$0{,}25\omega_C$	0,2425356250	$+75{,}96^o$	0,0623794998	$+159{,}34^o$	0,0151292509	$+235{,}3^o$

COPY

3	$0,5\omega_C$	0,4472135955	$+63,43^o$	0,2425528612	$+136,69^o$	0,1084729371	$+200,12^o$
4	ω_C	$\frac{1}{\sqrt{2}}$ atau 0,707	$+45^o$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$ atau 0,707	$+90^o$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$ atau 0,707	$+135^o$
5	$2\omega_C$	0,8944271909	$+26,56^o$	0,9702338206	$+43,31^o$	0,8678035107	$+69,87^o$
6	$4\omega_C$	0,9701425001	$+14,04^o$	0,9980713439	$+20,66^o$	0,9682714288	$+34,7^o$
7	$10\omega_C$	0,9950371902	$+5,71^o$	0,9999500037	$+8,13^o$	0,9949874420	$+13,84^o$

Contoh 6.13

Hitunglah frekuensi *cut-off* (ω_C) pada Gambar 5.6 apabila nilai C1 = C2 = C3 = C = 100nF, R3 = 20 K, R1 = 2. R3 = 40 K, R2 = 0,5.R3 = 10 K, Rf1 = Rf2 = 10K, RL = 10K!
Apabila $Vi = 100\sin(\omega.t + 60^o)mV$, hitunglah Vo pada frekuensi $0,1\omega_C$, $0,25\omega_C$, $0,5\omega_C$, ω_C, $2\omega_C$, $4\omega_C$, $10\omega_C$!

Penyelesaian: Karena nilai C1 = C2 = C3 = C = 100 nF dan R3 = 20 K, R1 = 2R3, R2 = 0,5R3 maka nilai frekuensi *cut-off* (ω_C) dari HPF +60 dB/dec adalah $\omega_C = \frac{1}{C.R3}$

$$\omega_C = \frac{1}{10^{-7}.2.10^4} = 500\text{rad/s}$$

Untuk $\omega = 0,1\omega_C = 50$rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2 - j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} \times \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{0,1\omega_C}\right)^2 - j\sqrt{2}.\left(\frac{0,1\omega_C}{0,1\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{0,1\omega_C}\right)}$$

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{(-99)^2 + (-14,14)^2} \times \frac{1}{1^2 - j(-10)^2} =$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{0,99^2 + 0,1414^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1^2 + 0,1^2}} = 0,001$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{-0,1414}{-0,99}\right) + tg^{-1}\left(\frac{-10}{1}\right)} = \frac{0^o}{-171,87^o + (-84,29)^o} = 0^o + 256,16^o = +256,16^o$$

$Vo = (0,001).100\sin(50.t + 60^o + \theta) = 0,1\sin(50.t + 316,16^o)mV$

Untuk $\omega = 0,25\omega_C = 125$rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2 - j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} \times \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{0,25\omega_C}\right)^2 - j\sqrt{2}.\left(\frac{0,1\omega_C}{0,25\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{0,25\omega_C}\right)}$$

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-(4)^2 - j\sqrt{2}.(4)} \times \frac{1}{1-j(4)} =$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{(-15)^2 + (-5,656)^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1^2 + (-4)^2}} = 0,015$$

COPY

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{-5,656}{-15}\right)+tg^{-1}\left(\frac{-4}{1}\right)} = \frac{0^o}{-159,34^o + (-75,96)^o} = 0^o + 235,3^o = +235,3^o$$

$$Vo = (0,015).100\sin(125.t + 60^o + \theta) = 1,5\sin(125.t + 295,3^o)mV$$

Untuk $\omega = 0,5\omega_C = 250$rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2 - j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} \times \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{0,5\omega_C}\right)^2 - j\sqrt{2}.\left(\frac{0,1\omega_C}{0,5\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{0,5\omega_C}\right)}$$

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-(2)^2 - j\sqrt{2}.(2)} \times \frac{1}{1-j(2)} =$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{(-3)^2 + (-2,828)^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1^2 + (-2)^2}} = 0,108$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{0,707}{0,75}\right)+tg^{-1}\left(\frac{0,5}{1}\right)} = \frac{0^o}{-136,69^o + (-63,44)^o} = 0^o + 200,12^o = +200,12^o$$

$$Vo = (0,108).100\sin(250.t + 60^o + \theta) = 10,8\sin(250.t + 260,12^o)mV$$

Untuk $\omega = \omega_C = 500$rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2 - j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} \times \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega_C}\right)^2 - j\sqrt{2}.\left(\frac{0,1\omega_C}{\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{\omega_C}\right)}$$

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-(1)^2 - j\sqrt{2}.(1)} \times \frac{1}{1-j(1)} =$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{0^2 + \left(-\sqrt{2}\right)^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1^2 + (-1)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,5$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{-\sqrt{2}}{0}\right)+tg^{-1}\left(\frac{-1}{1}\right)} = \frac{0^o}{-90^o + (-45)^o} = 0^o + 135^o = +135^o$$

$$Vo = (0,5).100\sin(500.t + 60^o + \theta) = 50\sin(500.t + 195^o)mV$$

Untuk $\omega = 2\omega_C = 1000$rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2 - j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} \times \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{2\omega_C}\right)^2 - j\sqrt{2}.\left(\frac{0,1\omega_C}{2\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{2\omega_C}\right)}$$

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-(1)^2 - j\sqrt{2}.(1)} \times \frac{1}{1-j(1)} =$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{0,75^2 + (-0,707)^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1^2 + (-0,5)^2}} = 0,868$$

COPY

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{-0,707}{0,75}\right)+tg^{-1}\left(\frac{-0,5}{1}\right)} = \frac{0^o}{-43,31^o + (-26,56)^o} = 0^o + 69,87^o = +69,87^o$$

$$Vo = (0,868).100\sin(1000.t + 60^o + \theta) = 86,8\sin(1000.t + 129,87^o)mV$$

Untuk $\omega = 4\omega_C = 2000$rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2 - j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} \times \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{4\omega_C}\right)^2 - j\sqrt{2}.\left(\frac{0,1\omega_C}{4\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{4\omega_C}\right)}$$

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-(0,25)^2 - j\sqrt{2}.(0,25)} \times \frac{1}{1-j(0,25)}$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{(0,9375)^2+(-0,3535)^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1^2+(-0,25)^2}} = 0,968$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{-0,3535}{0,9375}\right)+tg^{-1}\left(\frac{-0,25}{1}\right)} = \frac{0^o}{-20,66^o + (-14,04)^o} = 0^o + 34,7^o = +34,7^o$$

$$Vo = (0,968).100\sin(2000.t + 60^o + \theta) = 96,8\sin(2000.t + 94,7^o)mV$$

Untuk $\omega = 10\omega_C = 5000$rad/s,

$$\frac{Vo}{Vi} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)^2 - j\sqrt{2}.\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} \times \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{\omega}\right)} = \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_C}{10\omega_C}\right)^2 - j\sqrt{2}.\left(\frac{0,1\omega_C}{10\omega_C}\right)} \times \frac{1}{1-j\left(\frac{\omega_C}{10\omega_C}\right)}$$

$$\left|\frac{Vo}{Vi}\right| = \frac{1}{\sqrt{(0,99)^2+(-0,1414)^2}} \times \frac{1}{\sqrt{1^2+(-0,1)^2}} = 0,999$$

$$\theta = \frac{0^o}{tg^{-1}\left(\frac{-0,1414}{0,99}\right)+tg^{-1}\left(\frac{-0,1}{1}\right)} = \frac{0^o}{-8,13^o + (-5,71)^o} = 0^o + 13,84^o = +13,84^o$$

$$Vo = (0,999).100\sin(5000.t + 60^o + \theta) = 99,9\sin(2000.t + 73,84^o)mV$$

Tahap Perencanaan HPF +60 db/decade

1. Pilihlah frekuensi *cut-off* ω_C atau *fc*,
2. Pilihlah C1 = C2 = C3 = C antara 0,001 – 0,1 uF,
3. Hitunglah R3 dengan rumus $R3 = \frac{1}{\omega_C.C}$,
4. Pilihlah R1 = 0,5.R3,
5. Pilihlah R2 = 2.R3,
6. Pilihlah Rf1 = R2 dan Rf2 = R3.

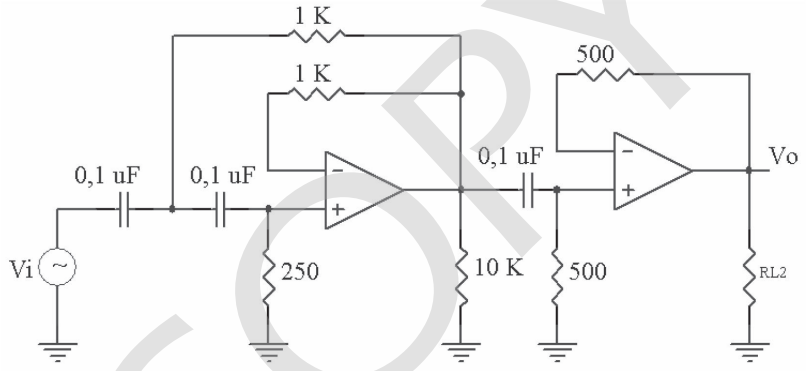
COPY

Contoh 6.14

Rancanglah HPF +60dB/dec dengan ω_C = 20*krad/det*!

Penyelesaian:

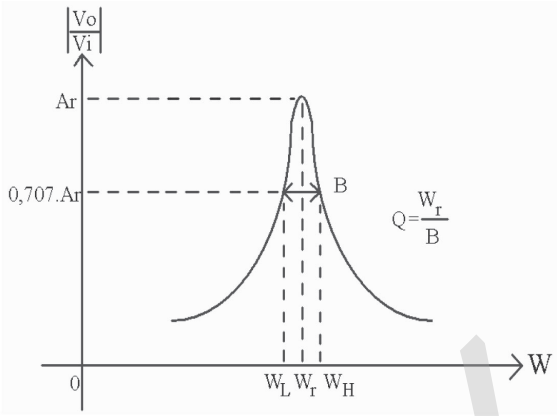
1. Dipilih frekuensi *cut-off* ω_C = 20*krad/det*
2. Dipilih C1 = C2 = C3 = 0,1 uF
3. Dihitung R3 yaitu $R3 = \frac{1}{\omega_C.C} = \frac{1}{2.10^4.10^{-7}} = 500\Omega$
4. Pilihlah R1 = 0,5. R3 yaitu R1 = 250
5. Pilihlah R2 = 2 . R3 = 1 K
6. Pilihlah Rf1 = 1 K dan Rf2 = 500.
   Rangkaian filter HPF +60 dB/dec dengan ω_C = 20*krad/det*



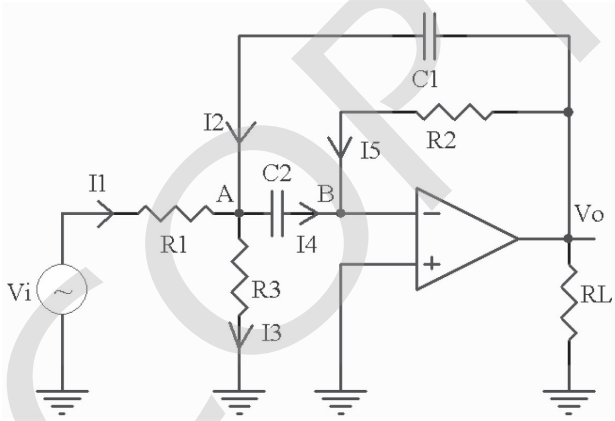
6.3 BPF (*Band Pass Filter*)

BPF (*Band Pass Filter*) adalah filter yang melewatkan sinyal dengan lebar bidang frekuensi (*bandwidth*) tertentu yang dibatasi oleh frekuensi *cut-off* rendah (*low*) (ω_{cL}) dan frekuensi *cut-off* atas (*high*) (ω_{cH}) dan membuang sinyal dengan frekuensi di bawah frekuensi *cut-off* rendah (ω_{cL}) dan frekuensi di atas frekuensi *cut-off* atas (ω_{cH}). BPF digolongkan menjadi filter pita sempit (*narrow band filter*) dan filter pita lebar (*wide band filter*). Filter pita sempit adalah filter yang mempunyai lebar bidang frekuensi (*bandwidth* = B) lebih kecil dari sepersepuluh frekuensi resonansinya ($B < 0{,}1\omega_r$). Sedangkan filter pita lebar mempunyai lebar bidang frekuensi lebih besar dari sepersepuluh frekuensi resonansinya ($B > 0{,}1\omega_r$). Perbandingan frekuensi resonansi dengan lebar bidang frekuensi dinamakan faktor kualitas (Q) atau $Q = \frac{\omega_r}{B}$. Filter pita sempit mempunyai Q lebih dari 10 dan filter pita lebar mempunyai Q kurang dari 10. *Band pass filer* (BPF) mempunyai respons frekuensi seperti gambar di bawah, di mana terdapat satu penguatan maksimum yaitu pada saat frekuensinya mengalami resonansi dinamakan penguatan pada frekuensi resonansi (A_r). Apabila penguatannya turun menjadi $\frac{1}{\sqrt{2}}.A_r$ atau 0,707.A_r maka ada dua buah frekuensi *cut-off* yaitu frekuensi *cut-off* rendah (*low*) (ω_{cL}) dan frekuensi *cut-off* atas (*high*) (ω_{cH}). Selisih dari frekuensi *cut-off* dinamakan B atau ($B = \omega_{cH} - \omega_{cL}$).

Grafik Frekuensi respons (tanggapan frekuensi) untuk BPF



Rangkaian Band Pass Filter (BPF) Butterworth



Gambar 6.7 *Rangkaian BPF*

Analisis rangkaiannya sebagai berikut:

$$I1 = \frac{Vi - VA}{R1} \tag{41}$$

$$I2 = (Vo - VA)j\omega.C1 \tag{42}$$

$$I3 = \frac{VA}{R3} \tag{43}$$

$$I4 = (VA - VB)j\omega C2 \tag{44}$$

$$I5 = \frac{Vo - VB}{R2} \tag{45}$$

$$VB = Virtual.ground = 0$$

Hukum Kirchoff I pada titik B,

$$I4 + I5 = i \tag{46}$$

$$j\omega.C2.VA + \frac{Vo}{R2} = 0$$

$$j\omega.C2.VA = -\frac{Vo}{R2}$$

$$VA = j\frac{Vo}{\omega.C2.R2} \tag{47}$$

Hukum Kirchoff I pada titik A,

$$I1 + I2 = I3 + I4 \tag{48}$$

$$\frac{Vi - VA}{R1} + j\omega.C1(Vo - VA) = \frac{VA}{R3} + j\omega.C2.VA$$

$$\frac{Vi}{R1} - \frac{VA}{R1} + j\omega.C1.Vo - j\omega.C1.VA = \frac{VA}{R3} + j\omega.C2.VA$$

$$\frac{Vi}{R1} + j\omega.C1.Vo = VA\left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R3} + j\omega.C1 + j\omega.C2\right)$$

$$\frac{Vi}{R1} + j\omega.C1.Vo = j\frac{Vo}{\omega.C2.R2}\left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R3} + j\omega.C1 + j\omega.C2\right)$$

$$\frac{Vi}{R1} + j\omega.C1.Vo = Vo\left(\frac{j}{\omega.C2.R2.R1} + \frac{j}{\omega.C2.R2.R3} - \frac{C1}{C2.R2} - \frac{1}{R2}\right)$$

$$\frac{Vi}{R1} = Vo\left(\frac{j}{\omega.C2.R2.R1} + \frac{j}{\omega.C2.R2.R3} - \frac{C1}{C2.R2} - \frac{1}{R2} - j\omega.C1\right)$$

$$\frac{Vo}{V1} = \frac{-\frac{1}{R1}}{\left(\frac{1}{R2} - \frac{C1}{C2.R2}\right) + j\left(-\frac{1}{R1.R2.\omega.C2} - \frac{1}{R2.R3.\omega.C2} + \omega.C1\right)}$$

$$A_{CL} = \frac{Vo}{V1} = -\frac{1}{\left(\frac{R1}{R2} + \frac{R1.C1}{C2.R2}\right) + j\left(-\frac{1}{R2.\omega.C2} - \frac{1}{R2.R3.\omega.C2} + \omega.C1.R1\right)} \tag{49}$$

Frekuensi resonansi apabila bagian imajiner sama dengan nol.

$$\omega_r.C1.R1 - \frac{1}{\omega_r.C2.R2} - \frac{R1}{\omega_r.C2.R2.R3} = 0$$

$$\omega_r.C1.R1 = \frac{1}{\omega_r.C2.R2} + \frac{R1}{\omega_r.C2.R2.R3}$$

$$\omega_r.C1.R1 = \frac{R3}{\omega_r.C2.R2.R3} + \frac{R1}{\omega_r.C2.R2.R3}$$

COPY

$$\omega_r.C1.R1=\frac{R3+R1}{\omega_r.C2.R2.R3}$$

$$\omega_r^{\,2}=\frac{R3+R1}{C1.C2.R1.R2.R3}$$

$$\omega_r=\sqrt{\frac{R3+R1}{C1.C2.R1.R2.R3}} \qquad (50)$$

A_r = Penguatan pada saat frekuensi sama dengan ω_r.

$$A_r=\frac{1}{\left(\frac{R1}{R2}+\frac{R1.C1}{R2.C2}\right)+j0} \text{ atau } A_r=\frac{1}{\left(\frac{R1}{R2}+\frac{R1.C1}{R2.C2}\right)}$$

Apabila C1 = C2 = C maka

$$\omega_r=\frac{1}{C}\sqrt{\frac{R1+R3}{R1.R2.R3}} \qquad (51)$$

$$A_r=\frac{1}{\left(\frac{R1}{R2}+\frac{R1}{R2}\right)}=\frac{1}{\frac{2.R1}{R2}}=\frac{R2}{2.R1} \qquad (52)$$

Apabila penguatannya $|A|$ turun menjadi $0{,}707.A_r$ atau $\frac{1}{\sqrt{2}}.A_r$ maka ada dua buah frekuensi yaitu frekuensi *cut-off* bawah (ω_{cL}) dan frekuensi *cut-off* atas (ω_{cH}).

Apabila C1 = C2 = C maka penguatannya adalah

$$A_{CL} = \frac{Vo}{V1}=-\frac{1}{\left(\frac{2.R1}{R2}\right)+j\left(-\frac{1}{R2.\omega.C}-\frac{R1}{R2.R3.\omega.C}+\omega.C.R1\right)}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}.A_r=|A|$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}.\frac{R2}{2.R1}=-\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2.R1}{R2}\right)^2+\left(-\frac{1}{\omega.C.R2}-\frac{R1}{\omega.C.R2.R3}+\omega.C.R1\right)^2}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}.\frac{1}{\frac{2.R1}{R2}}=-\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2.R1}{R2}\right)^2+j\left(-\frac{1}{\omega.C.R2}-\frac{R1}{\omega.C.R2.R3}+\omega.C.R1\right)^2}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2\left(\frac{2.R1}{R2}\right)^2}}=\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2.R1}{R2}\right)^2+\left(-\frac{1}{\omega.C.R2}-\frac{R1}{\omega.C.R2.R3}+\omega.C.R1\right)^2}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2.R1}{R2}\right)^2+\left(\frac{2.R1}{R2}\right)^2}}=\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2.R1}{R2}\right)^2+\left(-\frac{1}{\omega.C.R2}-\frac{R1}{\omega.C.R2.R3}+\omega.C.R1\right)^2}} \qquad (53)$$

COPY

Persamaan pertama:

$$\frac{2.R1}{R2} = -\frac{1}{\omega.C.R2} - \frac{R1}{\omega.C.R2.R3} + \omega.C.R1 \tag{54}$$

$$-\frac{1}{\omega.C.R2} - \frac{R1}{\omega.C.R2.R3} + \omega.C.R1 - \frac{2.R1}{R2} = 0$$

$$\frac{-R1.R3 - R1.R1 + \omega^2.C^2.R1^2.R2.R3 - 2\omega.C.R1^2.R3}{\omega.C.R1.R2.R3} = 0$$

$$\left(R1^2.R2.R3.C^2\right).\omega^2 + \left(-2R1^2.R3.C\right).\omega - R1(R1+R3) = 0$$

$$\left(R1.R2.R3.C^2\right).\omega^2 + \left(-2R1.R3.C\right).\omega - (R1+R3) = 0$$

$$\omega_{1,2} = \frac{2.R1.R3.C \pm \sqrt{\left(-2.R1.R3.C\right)^2 - 4\left(R1.R2.R3.C^2\right)(-1)(R1+R3)}}{2\left(R1.R2.R3.C^2\right)}$$

$$\omega_{1,2} = \frac{2.R1.R3.C \pm \sqrt{\left(4.R1^2.R3^2.C^2\right) - 4\left(R1^2.R2.R3.C^2\right) + 4\left(R1.R2.R3^2.C^2\right)}}{2\left(R1.R2.R3.C^2\right)}$$

$$\omega_{1,2} = \frac{2.R1.R3.C \pm \sqrt{\left(4.R1^2.R3^2.C^2\right)\left(1 + \frac{R2}{R3} + + \frac{R2}{R1}\right)}}{2\left(R1.R2.R3.C^2\right)}$$

$$\omega_{1,2} = \frac{2.R1.R3.C \pm 2.R1.R3.C\sqrt{\left(1 + \frac{R2}{R3} + + \frac{R2}{R1}\right)}}{2\left(R1.R2.R3.C^2\right)}$$

$$\omega_{1,2} = \frac{1 \pm \sqrt{\left(\frac{R1.R3 + R1.R2 + R2.R3}{R1.R3}\right)}}{R2.C^2}$$

$$\omega_1 = \frac{1 + \sqrt{\left(\frac{R1.R3 + R1.R2 + R2.R3}{R1.R3}\right)}}{R2.C^2} \text{ dan}$$

$$\omega_2 = \frac{1 - \sqrt{\left(\frac{R1.R3 + R1.R2 + R2.R3}{R1.R3}\right)}}{R2.C^2}$$

Persamaan kedua:

$$-\frac{2.R2}{R2} = -\frac{1}{\omega.C.R2} - \frac{R2}{\omega.C.R2} + \omega.C.R1 \tag{55}$$

$$-\frac{1}{\omega.C.R2} - \frac{R2}{\omega.C.R2} + \omega.C.R1 + \frac{2.R2}{R2} = 0$$

$$\frac{-R1.R3 - R1.R1 + \omega^2.C^2.R1^2.R2.R3 + 2.\omega.C.R1^2.R3}{\omega.C.R1.R2.R3} = 0$$

$$\left(R1^2.R2.R3.C^2\right).\omega^2 + \left(2R1^2.R3.C\right).\omega - R1.(R1+R3) = 0$$

COPY

$$\left(R1.R2.R3.C^2\right).\omega^2+\left(2R1.R3.C\right).\omega-\left(R1+R3\right)=0$$

$$\omega_{3,4}=\frac{-2.R1.R3.C\pm\sqrt{\left(2R1.R3.C\right)^2-4.\left(R1.R2.R3.C^2\right)(-1)(R1+R3)}}{2.\left(R1.R2.R3.C^2\right)}$$

$$\omega_{3,4}=\frac{-2.R1.R3.C\pm\sqrt{\left(4R1^2.R3^2.C^2\right)+4.\left(R1^2.R2.R3.C^2\right)+4.\left(R1.R2.R3^2.C^2\right)}}{2.\left(R1.R2.R3.C^2\right)}$$

$$\omega_{3,4}=\frac{-2.R1.R3.C\pm\sqrt{\left(4R1^2.R3^2.C^2\right)\left(1+\frac{R2}{R3}+\frac{R2}{R1}\right)}}{2.\left(R1.R2.R3.C^2\right)}$$

$$\omega_{3,4}=\frac{-2.R1.R3.C\pm 2.R1.R3.C\sqrt{\left(1+\frac{R2}{R3}+\frac{R2}{R1}\right)}}{2.\left(R1.R2.R3.C^2\right)}$$

$$\omega_{3,4}=\frac{-1\pm\sqrt{\left(\frac{R1.R3+R1.R2+R2.R3}{R1.R3}\right)}}{R2.C}$$

$$\omega_3=\frac{-1+\sqrt{\left(\frac{R1.R3+R1.R2+R2.R3}{R1.R3}\right)}}{R2.C}\ \&$$

$$\omega_3=\frac{-1-\sqrt{\left(\frac{R1.R3+R1.R2+R2.R3}{R1.R3}\right)}}{R2.C}$$

Frekuensi yang memenuhi adalah

$$\omega_3=\omega_L=\frac{-1+\sqrt{\left(\frac{R1.R3+R1.R2+R2.R3}{R1.R3}\right)}}{R2.C} \tag{56}$$

dan

$$\omega_1=\omega_H=\frac{1+\sqrt{\left(\frac{R1.R3+R1.R2+R2.R3}{R1.R3}\right)}}{R2.C} \tag{57}$$

Lebar bidang frekuensi (bandwidth) adalah $B=\omega_H-\omega_L$.

$$B=\frac{1+\sqrt{\left(\frac{R1.R3+R1.R2+R2.R3}{R1.R3}\right)}}{R2.C}-\frac{-1+\sqrt{\left(\frac{R1.R3+R1.R2+R2.R3}{R1.R3}\right)}}{R2.C}$$

$$B=\frac{2}{R2.C} \tag{58}$$

COPY

Faktor kualitas (Q) dari rangkaian adalah $Q = \frac{\omega_r}{B}$

$$Q = \frac{\frac{1}{C}\sqrt{\frac{R1+R3}{R1.R2.R3}}}{\frac{2}{R2.C}} = \frac{R2}{2}\sqrt{\frac{R1+R3}{R1.R2.R3}} \qquad (59)$$

Contoh 6.15

Hitunglah frekuensi resonansi (ω_H), penguatan pada frekuensi resonansi (*Ar*), frekuensi cut-off rendah (ω_{CH}), frekuensi cut-off atas (ω_{CH}), lebar bidang frekuensi (B), faktor kualitas (Q) pada Gambar 5.7 apabila nilai C1 = C2 = C = 100 nF, R1 = 20 K, R2 = 100 K, R3 = 1 K !
Apabila $Vi = 100\sin(\omega.t+60^o)mV$, hitunglah Vo pada frekuensi 250rad/s, 500rad/s, 1500rad/s, 2000rad/s!

Penyelesaian:

Karena C1 = C2 = C maka

$$\omega_r = \frac{1}{C}\sqrt{\frac{R1+R3}{R1.R2.R3}} = \frac{1}{10^{-7}}\sqrt{\frac{(20+1).10^3}{(20).(100).(1).10^9}} = \frac{1}{10^{-7}}.\frac{1}{10^4}\sqrt{\frac{21}{20}} = 1025\text{rad/s}$$

$$A_r = \frac{1}{\left(\frac{R1}{R2}+\frac{R1}{R2}\right)} = \frac{1}{\frac{2.R1}{R2}} = \frac{R2}{2.R1} = \frac{100K}{2.20K} = 2{,}5$$

$$\omega_{cL} = \frac{-1+\sqrt{\left(\frac{R1.R3+R1.R2+R2.R3}{R1.R3}\right)}}{R2.C} = \frac{-1+\sqrt{\left(\frac{20.1+20.100+100.1}{20.1}\right)}}{10^5.10^{-7}} =$$

$$\omega_{cL} = \frac{-1+\sqrt{\left(\frac{2120}{20}\right)}}{10^{-2}} = \frac{-1+\sqrt{106}}{10^{-2}} = \frac{-1+10{,}3}{10^{-2}} = 930\text{rad/s}$$

$$\omega_{cH} = \frac{1+\sqrt{\left(\frac{R1.R3+R1.R2+R2.R3}{R1.R3}\right)}}{R2.C} = \frac{1+\sqrt{\left(\frac{20.1+20.100+100.1}{20.1}\right)}}{10^5.10^{-7}} =$$

$$\omega_{cH} = \frac{1+\sqrt{\left(\frac{2120}{20}\right)}}{10^{-2}} = \frac{1+\sqrt{106}}{10^{-2}} = \frac{1+10{,}3}{10^{-2}} = 1130\text{rad/s}$$

Lebar bidang frekuensi (bandwidth) adalah $B = \omega_{cH} - \omega_{cL} = 1130 - 930 = 200$rad/s.

Faktor kualitas (Q) dari rangkaian adalah $Q = \frac{\omega_r}{B} = \frac{1025}{200} = 5{,}125$

Dengan menggunakan rumus:

$$B = \frac{2}{R2.C} = \frac{2}{10^5.10^{-7}} = 200\text{rad/s}$$

COPY

$$\omega_r = \frac{\frac{1}{C}\sqrt{\frac{R1+R3}{R1.R2.R3}}}{\frac{2}{R2.C}} = \frac{R2}{2}\sqrt{\frac{R1+R3}{R1.R2.R3}} = \frac{10^5}{2}\sqrt{\frac{(20+1).10^3}{(20).(100).(1).10^9}} = \frac{10^5}{2.10^4}\sqrt{\frac{21}{20}} = 5{,}125$$

Penguatan secara umum:

$$A_{CL} = \frac{Vo}{Vi} = -\frac{1}{\frac{2.R1}{R2} + j\left(-\frac{1}{R2.\omega.C} - \frac{1}{R2.R3.\omega.C} + \omega.C.R1\right)}$$

$$A_{CL} = \frac{Vo}{Vi} = -\frac{1}{\frac{2.20K}{100K} + j\left(-\frac{1}{10^5.\omega.10^{-7}} - \frac{2.10^4}{10^5.10^3.\omega.10^{-7}} + \omega.10^{-7}.2.10^4\right)}$$

$$A_{CL} = \frac{Vo}{Vi} = -\frac{1}{0{,}4 + j\left(-\frac{100}{\omega} - \frac{2000}{\omega} + \frac{\omega}{500}\right)}$$

Untuk $\omega = 250$rad/s

$$A_{CL} = \frac{Vo}{Vi} = -\frac{1}{0{,}4 + j\left(-\frac{100}{\omega} - \frac{2000}{\omega} + \frac{\omega}{500}\right)} = -\frac{1}{0{,}4 + j\left(-\frac{100}{250} - \frac{2000}{250} + \frac{250}{500}\right)}$$

$$A_{CL} = -\frac{1}{0{,}4 + j(-0{,}4 - 8 + 0{,}5)} = \frac{-1}{0{,}4 - j7{,}9}$$

$$|A_{CL}| = \frac{1}{\sqrt{(0{,}4)^2 + (-7{,}9)^2}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}16 + 62{,}41}} = \frac{1}{\sqrt{62{,}57}} = 0{,}13$$

$$\theta = \frac{180}{\text{tg}^{-1}\left(\frac{-7{,}9}{0{,}4}\right)} = \frac{\angle 180^o}{\angle -89{,}3^o} = 269{,}3^o$$

Jika $Vi = 100\sin(\omega.t + 60^o)mV$ maka $Vi = 13\sin(\omega.t + 329{,}3^o)mV$

Untuk $\omega = 500$rad/s

$$A_{CL} = \frac{Vo}{Vi} = -\frac{1}{0{,}4 + j\left(-\frac{100}{\omega} - \frac{2000}{\omega} + \frac{\omega}{500}\right)} = -\frac{1}{0{,}4 + j\left(-\frac{100}{500} - \frac{2000}{500} + \frac{500}{500}\right)}$$

$$A_{CL} = -\frac{1}{0{,}4 + j(-0{,}2 - 4 + 1)} = \frac{-1}{0{,}4 - j3{,}2}$$

$$|A_{CL}| = \frac{1}{\sqrt{(0{,}4)^2 + (-3{,}2)^2}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}16 + 10{,}24}} = \frac{1}{\sqrt{10{,}4}} = 0{,}31$$

$$\theta = \frac{180}{\text{tg}^{-1}\left(\frac{-3{,}2}{0{,}4}\right)} = \frac{\angle 180^o}{\angle -82{,}9^o} = 262{,}9^o$$

Jika $Vi = 100\sin(\omega.t + 60^o)mV$ maka $Vi = 13\sin(\omega.t + 322{,}9^o)mV$

COPY

Untuk $\omega = \omega_r$

$$A_{CL} = \frac{Vo}{Vi} = -\frac{1}{0{,}4 + j\left(-\frac{100}{\omega} - \frac{2000}{\omega} + \frac{\omega}{500}\right)} = -\frac{1}{0{,}4 + j(0)}$$

$$A_{CL} = -\frac{1}{(0{,}4)} \text{ atau } |A_{CL}| = \frac{1}{\sqrt{(0{,}4)^2 + (0)^2}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}14}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}4}} = 4$$

$$\theta = \frac{180}{\text{tg}^{-1}\left(\frac{0}{0{,}4}\right)} = \frac{\angle 180^o}{\angle 0^o} = 180^o$$

Jika $Vi = 100\sin(\omega.t + 60^o)mV$ maka $Vi = 400\sin(\omega.t + 240^o)mV$

Untuk $\omega = 1500$rad/s

$$A_{CL} = \frac{Vo}{Vi} = -\frac{1}{0{,}4 + j\left(-\frac{100}{\omega} - \frac{2000}{\omega} + \frac{\omega}{500}\right)} = -\frac{1}{0{,}4 + j\left(-\frac{100}{1500} - \frac{2000}{1500} + \frac{1500}{500}\right)}$$

$$A_{CL} = -\frac{1}{0{,}4 + j(-0{,}07 - 1{,}3 + 3)} = \frac{-1}{0{,}4 - j1{,}63}$$

$$|A_{CL}| = \frac{1}{\sqrt{(0{,}4)^2 + (1{,}63)^2}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}16 + 2{,}66}} = \frac{1}{\sqrt{2{,}82}} = 0{,}59$$

$$\theta = \frac{180}{\text{tg}^{-1}\left(\frac{1{,}63}{0{,}4}\right)} = \frac{\angle 180^o}{\angle 76{,}2^o} = 103{,}8^o$$

Jika $Vi = 100\sin(\omega.t + 60^o)mV$ maka $Vi = 59\sin(\omega.t + 163{,}8^o)mV$

Untuk $\omega = 2000$rad/s

$$A_{CL} = \frac{Vo}{Vi} = -\frac{1}{0{,}4 + j\left(-\frac{100}{\omega} - \frac{2000}{\omega} + \frac{\omega}{500}\right)} = -\frac{1}{0{,}4 + j\left(-\frac{100}{2000} - \frac{2000}{2000} + \frac{2000}{500}\right)}$$

$$A_{CL} = -\frac{1}{0{,}4 + j(-0{,}05 - 1 + 4)} = \frac{-1}{0{,}4 - j2{,}95}$$

$$|A_{CL}| = \frac{1}{\sqrt{(0{,}4)^2 + (2{,}95)^2}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}16 + 8{,}7}} = \frac{1}{\sqrt{8{,}86}} = 0{,}34$$

$$\theta = \frac{180}{\text{tg}^{-1}\left(\frac{2{,}95}{0{,}4}\right)} = \frac{\angle 180^o}{\angle 82{,}3^o} = 97{,}7^o$$

Jika $Vi = 100\sin(\omega.t + 60^o)mV$ maka $Vi = 13\sin(\omega.t + 157{,}7^o)mV$

Contoh 6.16

Hitunglah frekuensi resonansi (ω_r), penguatan pada frekuensi resonansi (*Ar*), frekuensi *cut-off* rendah (ω_{cL}), frekuensi *cut-off* atas (ω_{cH}), lebar bidang frekuensi (B), faktor kualitas (Q) pada Gambar 5.7 apabila nilai C1 =

COPY

C2 = C = 100 nF, R1 = 10 K, R2 = 200 K, R3 =0,5 K!

Penyelesaian:

Karena C1 = C2 = C maka

$$\omega_r = \frac{1}{C}\sqrt{\frac{R1+R3}{R1.R2.R3}} = \frac{1}{10^{-7}}\sqrt{\frac{(10+0,5).10^3}{(20).(100).(0,5).10^9}} = \frac{1}{10^{-7}}.\frac{1}{10^4}\sqrt{\frac{10,5}{20}} = 1025\text{rad/s}$$

$$A_r = \frac{1}{\left(\frac{R1}{R2}+\frac{R1}{R2}\right)} = \frac{1}{\frac{2.R1}{R2}} = \frac{R2}{2.R1} = \frac{200\text{K}}{2.20\text{K}} = 10$$

$$\omega_{cL} = \frac{-1+\sqrt{\left(\frac{R1.R3+R1.R2+R2.R3}{R1.R3}\right)}}{R2.C} = \frac{-1+\sqrt{\left(\frac{10.0,5+10.200+200.0,5}{10.0,5}\right)}}{2.10^5.10^{-7}} =$$

$$\omega_{cL} = \frac{-1+\sqrt{\left(\frac{2105}{5}\right)}}{2.10^{-2}} = \frac{-1+\sqrt{421}}{2.10^{-2}} = \frac{-1+20,5}{2.10^{-2}} = 975\text{rad/s}$$

$$\omega_{cH} = \frac{1+\sqrt{\left(\frac{R1.R3+R1.R2+R2.R3}{R1.R3}\right)}}{R2.C} = \frac{1+\sqrt{\left(\frac{10.0,5+10.200+200.0,5}{10.0,5}\right)}}{2.10^5.10^{-7}} =$$

$$\omega_{cH} = \frac{1+\sqrt{\left(\frac{2105}{5}\right)}}{2.10^{-2}} = \frac{1+\sqrt{421}}{2.10^{-2}} = \frac{1+20,5}{2.10^{-2}} = 1075\text{rad/s}$$

Lebar bidang frekuensi (bandwidth) adalah $B = \omega_{cH} - \omega_{cL} = 1075 - 975 = 100$rad/s..

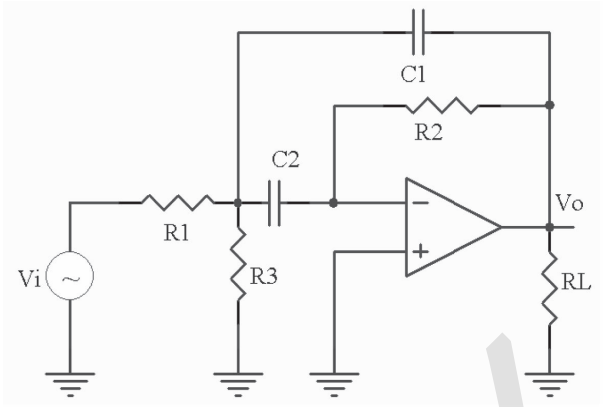
Faktor kualitas (Q) dari rangkaian adalah $Q = \frac{\omega_r}{B} = \frac{1025}{100} = 10,25$

Tahap Perencanaan BPF

1. Bila yang diketahui B dan Q maka yang dihitung ω_r,
   Bila yang diketahui B dan ω_r maka yang dihitung Q,
   Bila yang diketahui Q dan ω_r maka yang dihitung B,
2. Pilih C1 = C2 = C3 = C,
3. Hitunglah R2 dari rumus $R2 = \frac{2}{B.C}$,
4. Hitunglah R1 dari rumus $R1 = \frac{R2}{2.Ar}$,
5. Hitunglah R3 dari rumus $R3 = \frac{R2}{4.Q^2 - 2.Ar}$.

COPY

Rangkaian BPF hasil perencanaan:



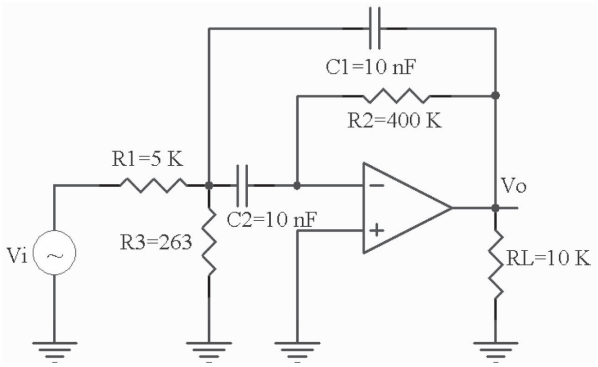
Contoh 6.17

Rancanglah filter BPF dengan data ω_r = 10krad/det, Ar = 40, Q = 20 dan C1 = C2 = C3 = 10 nF.

Penyelesaian:

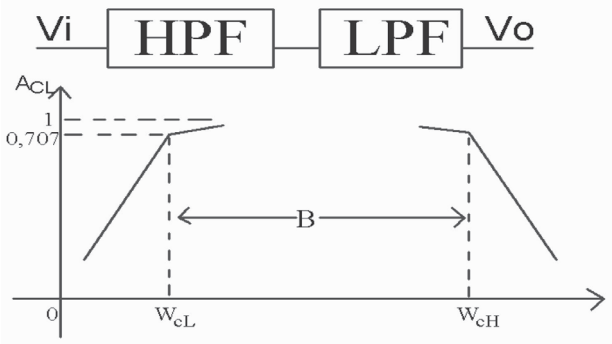
1. Hitung B dengan rumus $Q = \frac{\omega_r}{B}$ ..... $B = \frac{\omega_r}{Q} = \frac{10\text{krad/det}}{20} = 500\text{rad/det}$
2. Pilih C1 = C2 = C3 = C = 10 nF
3. Hitunglah R2 dari rumus $R2 = \frac{2}{B.C} = \frac{2}{500.10^{-8}} = 400k\Omega$
4. Hitunglah R1 dari rumus $R1 = \frac{R2}{2.Ar} = \frac{400k}{2.40} = 5k\Omega$
5. Hitunglah R3 dari rumus $R3 = \frac{R2}{4.Q^2 - 2.Ar} = \frac{400k}{4.(400) - 2.40} = 263k\Omega$

Rangkaian BPF hasil perencanaannya:



*BPF (*Band Pass Filter*) untuk pita lebar (*wide band*) juga dapat disusun dari gabungan LPF dan HPF yang mempunyai daerah frekuensi yang lebar sesuai dengan yang diinginkan. Karakteristik dari filter ini dan perencanaannya sama seperti pada LPF dan HPF.

COPY



Gambar 6.8 *Blok diagram dan karakteristik BPF dari LPF dan HPF*

Contoh 6.18

Rancanglah filter BPF yang disusun dari HPF +40 dB/dec dengan LPF -40 dB/dec dengan data ω_{cL} = 125rad/s dan ω_{cH} = 125krad/det.

Penyelesaian:

ω_{cL} = 125rad/s merupakan ω_c dari HPF +40 dB/dec.

ω_{cH} = 125krad/det merupakan ω_c dari LPF -40 dB/dec.

Penyelesaian dari HPF +40 dB/dec:

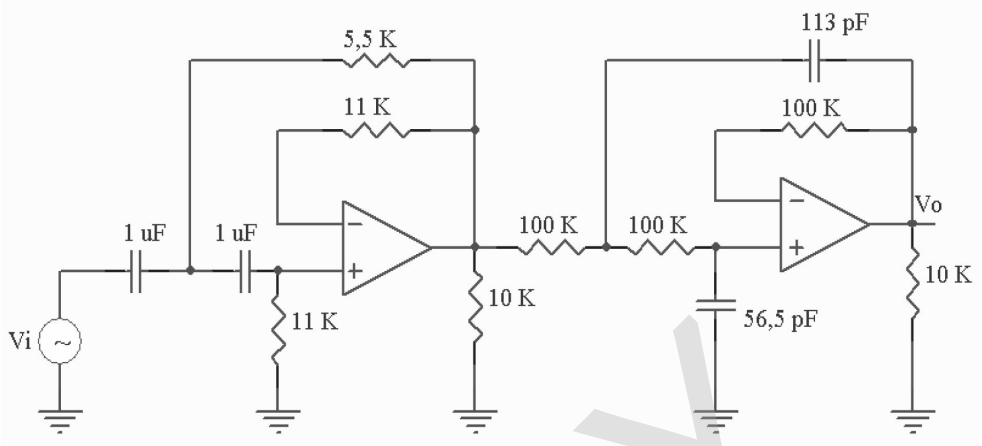
1. Dipilih frekuensi *cut-off* ω_{cL} = 125rad/s
2. Dipilih C1 = C2 = C = 1 uF
3. Dihitung R1 yaitu $R1 = \frac{1,414}{\omega_C.C} = \frac{1,414}{125.10^{-6}} = 11k\Omega$
4. Pilihlah R2 = 0,5.R1 yaitu R2 = 5,5 K
5. Pilihlah Rf = R1 = 11 K.

Penyelesaian dari LPF -40 dB/dec:

1. Dipilih frekuensi cut-off ω_{cH} = 125krad/det
2. Pilihlah R1 = R2 = R yaitu antara 100 K
3. Hitunglah C1 dengan rumus $R1 = \frac{0,707}{\omega_C.C} = \frac{0,707}{125.10^3.10^5} = 56,5pF$
4. Pilihlah C2 = 2.C1 yaitu C2 = 2.(56,5) = 113 pF
5. Pilihlah Rf = 2R yaitu Rf = 200 K.

COPY

Rangkaiannya BPF, terdiri HPF dan LPF.

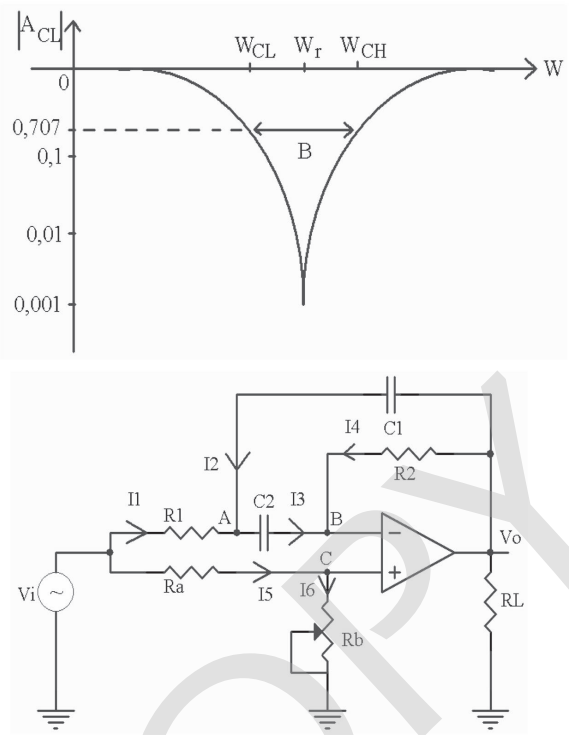


6.4 BSF/BEF/Notch Filter

BSF (*Band stop filter*) adalah filter kebalikan dari BPF yaitu filter yang membuang (*stop*) sinyal dengan lebar bidang frekuensi (*bandwidth*) tertentu yang dibatasi oleh frekuensi cut-off rendah (*low*) (ω_{cL}) dan frekuensi *cut-off* atas (*high*) (ω_{cH}) dan melewatkan (pass) sinyal dengan frekuensi di bawah frekuensi cut-off rendah (ω_{cL}) dan frekuensi di atas frekuensi *cut-off* atas (ω_{cH}). BSF atau Notch filter digolongkan menjadi filter pita sempit (*narrow band filter*) dan filter pita lebar (*wide band filter*). Filter pita sempit adalah filter yang mempunyai lebar bidang frekuensi (*bandwidth* – B) lebih kecil dari sepersepuluh frekuensi resonansinya ($B < 0{,}1.\omega_r$). Sedangkan filter pita lebar mempunyai lebar bidang frekuensi lebih besar dari sepersepuluh frekuensi resonansinya ($B > 0{,}1.\omega_r$). Perbandingan frekuensi resonansi dengan lebar bidang frekuensi dinamakan faktor kualitas (Q) atau $Q = \frac{\omega_c}{B}$. Filter pita sempit mempunyai Q lebih dari 10 dan filter pita lebar mempunyai Q kurang dari 10. Band pass filer (BPF) mempunyai respons frekuensi seperti gambar di bawah, di mana terdapat satu penguatan minimum yaitu pada saat frekuensinya mengalami resonansi dinamakan penguatan pada frekuensi resonansi (A_r). Apabila penguatannya naik menjadi $\frac{1}{\sqrt{2}}$ atau 0,707 maka ada dua buah frekuensi *cut-off* yaitu frekuensi *cut-off* rendah (*low*) (ω_{cL}) dan frekuensi *cut-off* atas (*high*) (ω_{cH}). Selisih dari frekuensi *cut-off* dinamakan B atau ($B = \omega_{cH} - \omega_{cL}$) .

Grafik Frekuensi respons (tanggapan frekuensi) untuk BSF/ Notch Filter

COPY



Gambar 6.9 *Rangkaian BSF/BEF/ Notch Filter*

Persamaan arus dari rangkaian,

$$I1 = \frac{Vi - VA}{R1} \tag{60}$$

$$I2 = (Vo - VA)\, j\omega.C1 \tag{61}$$

$$I3 = (VA - VB)\, j\omega.C2 \tag{62}$$

$$I4 = \frac{Vo - VB}{R2} \tag{63}$$

$$I5 = \frac{Vi - VB}{Ra} \tag{64}$$

$$I6 = \frac{VB}{Rb} \tag{65}$$

$$VB = VC$$

Hukum Kirchoff I pada titik C,

$$I5 = I6 \tag{66}$$

COPY

$$VB = VC = \frac{Rb}{Ra+Rb}.Vi$$

$$\frac{Vi-VB}{Ra} = \frac{VB}{Rb}$$

$$\frac{Vi}{Ra}-\frac{VB}{Ra} = \frac{VB}{Rb}$$

$$\frac{Vi}{Ra} = \frac{VB}{Ra}+\frac{VB}{Rb}$$

$$\frac{Vi}{Ra} = VB\left(\frac{1}{Ra}+\frac{1}{Rb}\right)$$

$$VB\left(\frac{Ra+Rb}{Ra.Rb}\right) = \frac{Vi}{Ra}$$

Hukum Kirchoff I pada titik B,

$$I3 + I4 = i \tag{67}$$

$$(VA-VB)j\omega C2 + \frac{Vo-VB}{R2} = 0$$

$$VA.j\omega.C2 - VB.j\omega.C2 = \frac{-Vo}{R2}+\frac{VB}{R2}$$

$$VA.j\omega.C2 = \frac{-Vo}{R2}+VB\left(\frac{j\omega.C2.R2+1}{R2}\right)$$

$$VA = \frac{-Vo}{j\omega.C2.R2}+VB\left(\frac{j\omega.C2.R2+1}{j\omega.C2.R2}\right)$$

$$VA = \frac{-Vo}{j\omega.C2.R2}+VB\left(1+\frac{1}{j\omega.C2.R2}\right) \tag{68}$$

Hukum Kirchoff I pada titik A,

$$I1 + I2 = I3 \tag{69}$$

$$\frac{Vi-VA}{R1}+(Vo-VA)j\omega.C1 = (VA-VB)j\omega.C2$$

$$\frac{Vi}{R1}-\frac{VA}{R1}+Vo.j\omega.C1-VA.j\omega.C1 = VA.j\omega.C2-VB.j\omega.C2$$

$$\frac{Vi}{R1}+Vo.j\omega.C1=\frac{VA}{R1}+VA.j\omega.C1+VA.j\omega.C2-VB.j\omega.C2$$

$$\frac{Vi}{R1}+Vo.j\omega.C1=VA\left(\frac{1}{R1}+j\omega.C1+C2\right)-VB.j\omega.C2$$

$$\frac{Vi}{R1}+Vo.j\omega.C1=\left\{\frac{-Vo}{j\omega.C2.R2}+VB\left(1+\frac{1}{j\omega.C2.R2}\right)\right\}\left(\frac{1}{R1}+j\omega.(C1+C2)\right)-VB.j\omega.C2$$

COPY

$$\frac{Vi}{R1}+Vo\left(j\omega.C1+\frac{1}{j\omega.C2.R1.R2}+\frac{C1+C2}{C1.C2}\right)=VB\left(1+\frac{1}{j\omega.C2.R2}\right)\left(\frac{1}{R1}+j\omega.(C1+C2)\right)-VB.j\omega.C2$$

$$\frac{Vi}{R1}+Vo\left(j\omega.C1+\frac{1}{j\omega.C2.R1.R2}+\frac{C1+C2}{C1.C2}\right)=VB\left(\left(1+\frac{1}{j\omega.C2.R2}\right)\left(\frac{1}{R1}+j\omega.(C1+C2)\right)-j\omega.C2\right)$$

$$Vo\left(j\omega.C1+\frac{1}{j\omega.C2.R1.R2}+\frac{C1+C2}{C1.C2}\right)=VB\left(\left(1+\frac{1}{j\omega.C2.R2}\right)\left(\frac{1}{R1}+j\omega.(C1+C2)\right)-j\omega.C2\right)-\frac{Vi}{R1}$$

$$\frac{Vo}{V1}=\frac{-\frac{1}{R1}+\frac{Rb}{Ra+Rb}\left(\frac{1}{R1}+j\omega(C1+C2)+\frac{1}{j\omega.C2.R1.R2}+\frac{C1+C2}{C1.C2}-j\omega.C2\right)}{j\omega.C1+\frac{1}{j\omega.C2.R1.R2}+\frac{C1+C2}{C1.C2}}$$

Jika C1 = C2 = C maka

$$\frac{Vo}{V1}=\frac{-\frac{1}{R1}+\frac{Rb}{Ra+Rb}\left(\frac{1}{R1}+j\omega.C+\frac{1}{j\omega.C.R1.R2}+\frac{2}{R2}\right)}{j\omega.C+\frac{1}{j\omega.C.R1.R2}+\frac{2}{R2}} \tag{70}$$

$$\frac{Vo}{V1}=\frac{-1+\frac{Rb}{Ra+Rb}\left(1+j\omega.C.R1+\frac{1}{j\omega.C.R2}+\frac{2R1}{R2}\right)}{\frac{2R1}{R2}+j\omega.C.R1+\frac{1}{j\omega.C.R2}}$$

$$\frac{Vo}{V1}=\frac{1+\frac{Rb}{Ra+Rb}\left(1-j\omega.C.R1-\frac{1}{j\omega.C.R2}-\frac{2R1}{R2}\right)}{-\frac{2R1}{R2}-j\omega.C.R1-\frac{1}{j\omega.C.R2}}$$

$$A_{CL}=\frac{Vo}{V1}=\frac{1+\frac{Rb}{Ra+Rb}\left(\left(-1-\frac{2.R1}{R2}\right)+j\left(\frac{1}{\omega.C.R2}-\omega.C.R1\right)\right)}{-\frac{2R1}{R2}-j\left(\frac{1}{j\omega.C.R2}-\omega.C.R1\right)} \tag{71}$$

Frekuensi resonansi apabila bagian imajiner sama dengan nol.

$$\frac{1}{\omega_r.C.R2}-\omega_r.C.R1=0 \tag{72}$$

$$\frac{1}{\omega_r.C.R2}=\omega_r.C.R1$$

$$\omega_r^2.C^2.R1.R2=1$$

$$\omega_r^2=\frac{1}{C^2.R1.R2}$$

$$\omega_r=\frac{1}{C\sqrt{R1.R2}} \tag{73}$$

COPY

A_r = Penguatan pada saat frekuensi sama dengan .

$$A_r = \frac{1+\frac{Rb}{Ra+Rb}\left(\left(-1-\frac{2.R1}{R2}\right)\right)}{-\frac{2R1}{R2}} \text{ atau } A_r = \frac{1+\frac{Rb}{Ra+Rb}\left(\left(\frac{-R2-2.R1}{R2}\right)\right)}{-\frac{2R1}{R2}}$$

$$A_r = \frac{-R2}{2.R1}+\frac{Rb}{Ra+Rb}\left(\frac{R2+2.R1}{2.R1}\right) \quad (74)$$

Apabila penguatannya $|A_{CL}|$ turun menjadi 0,707 atau $\frac{1}{\sqrt{2}}$ maka ada dua buah frekuensi yaitu frekuensi *cut-off* bawah (ω_{cL}) dan frekuensi *cut-off* atas (ω_{cH}).

Lebar bidang frekuensi (*bandwidth*) adalah $B = \frac{2}{R2.C}$ (75)

Contoh 6.19

Hitunglah frekuensi resonansi (ω_r), lebar bidang frekuensi (B), faktor kualitas (Q) pada Gambar 5.9 apabila nilai C1 = C2 = C = 100 nF, R1 = 20 K, R2 = 100 K, R3 = 1 K!

Penyelesaian:

Karena C1 = C2 = C maka

$$\omega_r = \frac{1}{C\sqrt{R1.R2}} = \frac{1}{10^{-7}\sqrt{10^4.10^5}} = \frac{1}{10^{-7}}.\frac{1}{10^4}(0{,}22) = 220\text{rad/s}$$

$$B = \frac{2}{R2.C} = \frac{1}{10^5.10^{-7}} = 200\text{rad/s}$$

$$Q = \frac{\omega_r}{B} = \frac{220}{200} = 1{,}1$$

Contoh 6.20

Hitunglah frekuensi resonansi (ω_r), lebar bidang frekuensi (B), faktor kualitas (Q) pada Gambar 5.9 apabila nilai C1 = C2 = C = 10 nF, R1 = 1 K, R2 = 400 K, R3 = 1 K.

Penyelesaian:

Karena C1 = C2 = C maka

$$\omega_r = \frac{1}{C\sqrt{R1.R2}} = \frac{1}{10^{-8}\sqrt{10^3.4.10^5}} = \frac{1}{10^{-8}}.\frac{1}{2.10^4}(0{,}22) = 5000\text{rad/s}$$

$$B = \frac{2}{R2.C} = \frac{1}{4.10^5.10^{-8}} = 500\text{rad/s}$$

$$Q = \frac{\omega_r}{B} = \frac{5000}{500} = 10$$

Tahap perencanaan BSF/ Notch Filter

1. Bila yang diketahui B dan Q maka yang dihitung ω_r,

COPY

Bila yang diketahui B dan ω_r maka yang dihitung Q,
Bila yang diketahui Q dan ω_r maka yang dihitung B,

2. Pilih C1 = C2 = C,
3. Hitunglah R2 dari rumus $R2 = \frac{2}{B.C}$,
4. Hitunglah R1 dari rumus $R2 = \frac{R2}{4.Q^2}$,
5. Pilih Ra, misalkan suatu harga yang sesuai seperti 1KΩ,
6. Hitunglah Rb dari rumus $Rb = 2.Q^2.Ra$.

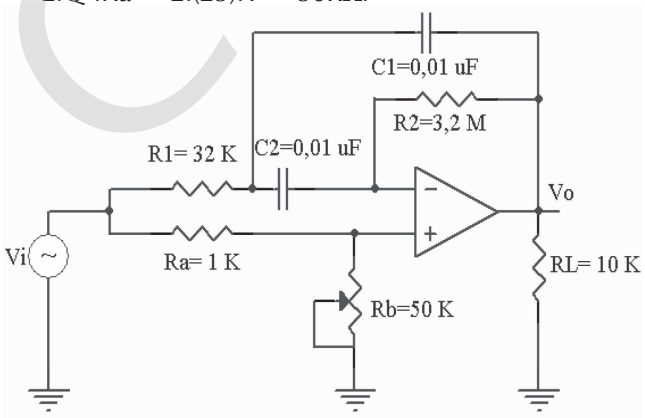
Contoh 6.21

Rancanglah BSF dengan dan Q = 5. Pilihlah C1 = C2 = C = 0,01 uF.

Penyelesaian: $\omega_r = 2.\pi.fr = 2.(3,14).50 = 314$rad/det

Tahap perencanaannya:

1. Rumus $Q = \frac{\omega_r}{B}$.....*maka*.....$B = \frac{\omega_r}{Q} = \frac{314}{5} = 63$rat/det
2. Pilih C1 = C2 = C = 0,01 uF
3. Hitung R2 yaitu $R2 = \frac{2}{B.C} = \frac{2}{63.\left(10^{-8}\right)} = 3,2\text{M}\Omega$
4. Hitung R1 yaitu $R2 = \frac{R2}{4.Q^2} = \frac{3,2\text{M}\Omega}{4.(25)} = 32\text{k}\Omega$
5. Pilih Ra = 1 K
6. Hitunglah Rb yaitu $Rb = 2.Q^2.Ra = 2.(25).1 = 50\text{K}\Omega$.



Contoh 6.22

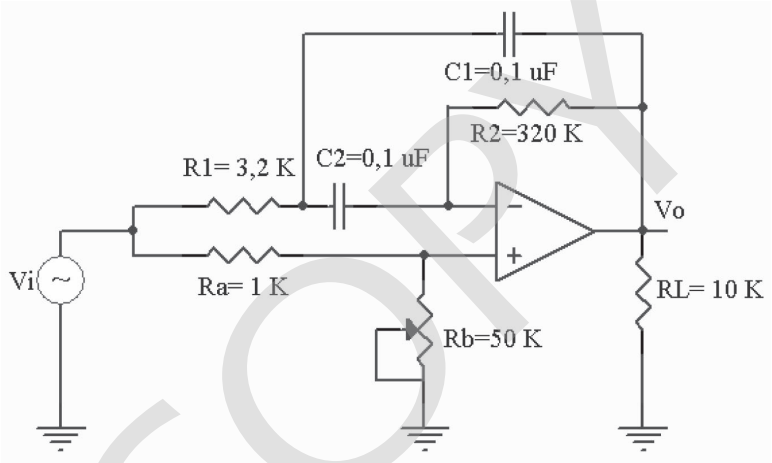
Rancanglah BSF dengan dan Q = 10. Pilihlah C1 = C2 = C = 0,1 uF.

Penyelesaian: $\omega_r = 2.\pi.fr = 2.(3,14).100 = 628$rad/det

COPY

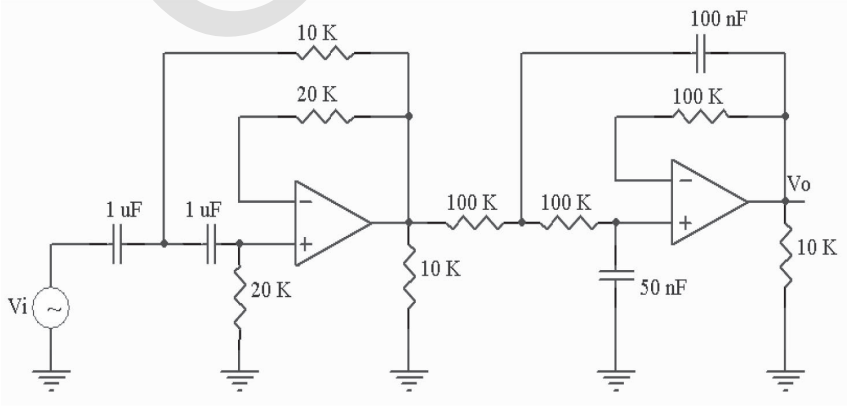
Tahap perencanaannya:

1. Rumus $Q = \frac{\omega_r}{B}$.....*maka*.....$B = \frac{\omega_r}{Q} = \frac{628}{10} = 63\text{rad/det}$
2. Pilih C1 = C2 = C = 0,1 uF
3. Hitung R2 yaitu $R2 = \frac{2}{B.C} = \frac{2}{63.(10^{-7})} = 320\text{K}\Omega$
4. Hitung R1 yaitu $R2 = \frac{R2}{4.Q^2} = \frac{320\text{K}\Omega}{4.(25)} = 3{,}2\text{k}\Omega$
5. Pilih Ra = 1 K
6. Hitunglah Rb yaitu $Rb = 2.Q^2.Ra = 2.(25).1 = 50\text{K}\Omega$.



Latihan Soal

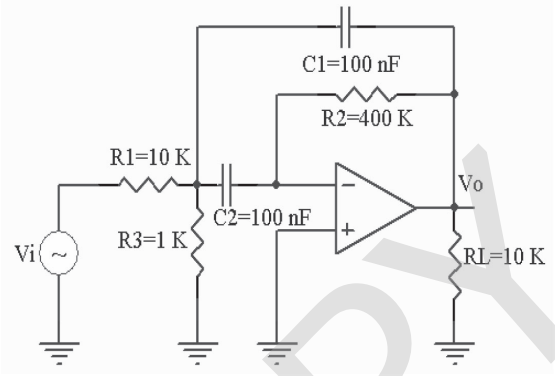
1. Hitunglah frekuensi *cut-off* pada bagian depan dan bagian belakang!



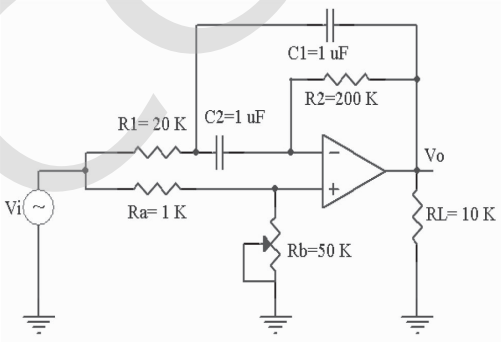
2. Rancanglah LPF -20 dB/dec dengan ω_r = 100rad/det!
3. Rancanglah LPF -40 dB/dec dengan ω_r = 200rad/det!
4. Rancanglah LPF -60 dB/dec dengan ω_r = 250rad/det!

COPY

5. Rancanglah HPF +20 dB/dec dengan ω_r = 10krad/det!
6. Rancanglah HPF +40 dB/dec dengan ω_r = 5krad/det!
7. Rancanglah HPF +60 dB/dec dengan ω_r = 50krad/det!
8. Hitunglah frekuensi resonansi (ω_r), penguatan pada frekuensi resonansi (A_r), frekuensi *cut-off* rendah (ω_{cL}), frekuensi *cut-off* atas (ω_{cH}), lebar bidang frekuensi (B), faKtor kualitas (Q) pada gambar di bawah dan apabila nilai C1 = C2 = C = 100 nF, R1 = 10 K, R2 = 400 K, R3 = 1 K!



9. Rancanglah filter BPF dengan data ω_r = 1krad/det!, Ar = 10, Q = 10 dan C1 = C2 = C3 = 10 nF!
10. Rancanglah filter BPF yang disusun dari HPF +40 dB/dec dengan LPF -40 dB/dec dengan data ω_{cL} = 1000krad/det dan ω_{cH} = 5000krad/det !
11. Hitunglah frekuensi resonansi (ω_r), lebar bidang frekuensi (B), faktor kualitas (Q) pada gambar apabila nilai C1 = C2 = C = 1 uF, R1 = 20 K, R2 = 200 K, Ra = 1 K, Rb = 50K!



12. Rancanglah BSF dengan *fr* = 50Hz dan Q = 20, pilihlah C1 = C2 = C = 10 nF!
13. Rancanglah BSF dengan *fr* = 100Hz dan Q = 20, pilihlah C1 = C2 = C = 1 nF!

COPY

COPY

BAB 7

Parameter Op-Amp Mode DC (Arus Bias, Arus Offset, Tegangan Offset, Arus Drift)

COPY

7.1 Pendahuluan

Penguat Operasional (*operational amplifier*) atau Op-Amp di dalam rangkaian elektronika sangat luas pemakaiannya terutama sebagai penguat (*amplifier*), baik sebagai penguat sinyal DC maupun sinyal AC atau gabungannya. Tegangan *output* (Vo) dari op-amp secara ideal harus sama dengan perkalian sinyal DC dengan penguatan *close loop*-nya, kenyataannya tegangan *output* (Vo) mengalami kesalahan. Kesalahan pada op-amp diakibatkan bahwa pada op-amp nyata mempunyai parameter yang memang dapat menyebabkan terjadinya kesalahan yaitu akibat pada daerah DC dan pada daerah AC. Pada daerah DC adalah

1. Arus bias masukan (*input bias current*)
2. Arus offset masukan (*input offset current*)
3. Tegangan offset masukan (*input offset voltage*)
4. Hanyutan (drift)

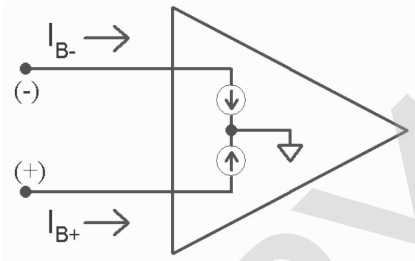
Sedangkan pada daerah AC adalah

1. Tanggapan frekuensi (*frequency response*)
2. Laju ubah (*slew rate*)

Respons frekuensi berhubungan dengan *gain* (penguatan *open loop*) yang berubah terhadap perubahan frekuensi. Pada umumnya apabila frekuensi semakin besar maka penguatan *open loop*-nya semakin kecil atau menurun.

7.2 Arus Bias Masukan (*Input Bias Current*)

Untuk op-amp yang ideal mempunyai arus bias sama dengan nol, tetapi kenyataannya bahwa bagian depan dari op-amp tersusun dari transistor-transistor yang memang memerlukan arus bias untuk bisa aktif. Arus bias disimbolkan dengan I_{B-} yaitu arus bias yang masuk pada negatif (*inverting*) input dan I_{B+} adalah arus bias yang masuk pada positif (*noninverting*) *input*. Nilai arus bias dalam orde μ*A*. Arus bias rata-rata adalah penjumlahan dari I_{B+} dan I_{B-} kemudian dibagi dua. Bentuk persamaannya adalah $I_B = \frac{|I_{B+}| + |I_{B-}|}{2}$.



Gambar 7.1 *Model untuk arus bias*

7.3 Arus Offset Masukan (*Input Offset Current*)

Arus offset masukan adalah besarnya selisih antara arus bias I_{B+} dan I_{B-} dan ditulis I_{OS}. Besarnya arus offset adalah $I_{OS} = |I_{B+}| - |I_{B-}|$.

Nilai dari I_{OS} biasanya adalah 25%I_B.

Contoh 7.1

Nilai dari $I_{B+} = 0{,}6\mu A$ dan $I_{B-} = 0{,}4\mu A$.
Carilah (a) arus bias rata-rata (I_B), (b) arus offset (I_{OS})!

Penyelesaian:

(a) $I_B = \frac{|I_{B+}| + |I_{B-}|}{2} = \frac{0{,}6 + 0{,}4}{2} = 0{,}5\mu A$

(b) $I_{OS} = |I_{B+}| - |I_{B-}| = 0{,}6 - 0{,}4 = 0{,}2\mu A$

7.4 Efek Arus Bias pada Tegangan *Output*

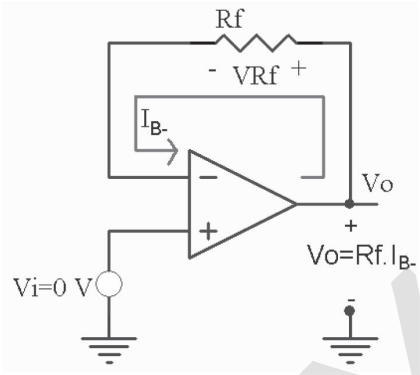
Arus bias merupakan salah satu sifat op-amp yang menyebabkan adanya suatu yang tidak diinginkan pada tegangan *output* op-amp.

7.4.1 Efek Arus Bias Masukan (–)

Tegangan *output* dari setiap rangkaian pada Gambar 6.2 yaitu *voltage follower* dan *inverting amplifier* seharusnya mempunyai tegangan *output* sama dengan nol karena tegangan input (Vi) sama dengan nol. Dalam kenyataannya tidak demikian karena adanya arus bias negatif (I_{B-}). Tegangan *output* mengalami kesalahan

COPY

akibat arus bias, yaitu arus bias yang melewati tahanan feedback (Rf) dan masuk ke masukan negatif. Besarnya tegangan *output* adalah $Vo = R_f.I_{B-}$. Sedangkan pada masukan positif tidak menyebabkan kesalahan pada tegangan *output* karena arus bias I_{B+} melewati 0Ω.



Gambar 7.2 *Rangkaian voltage follower*

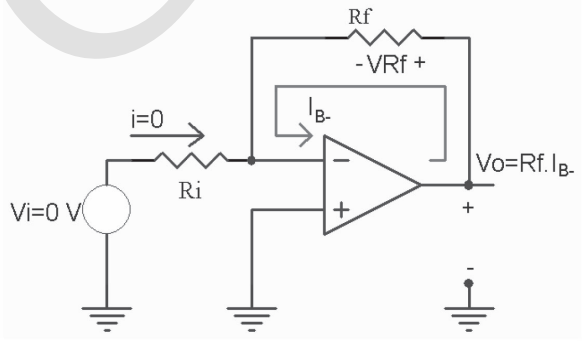
Contoh 7.2

Nilai dari $R_F = 1M\Omega$ dan $V_O = 0,3$volt

Carilah arus bias masukan negatif (I_{B-})

Penyelesaian: $I_{B-} = \dfrac{Vo}{Rf} = \dfrac{0,3V}{1M\Omega} = 0,3\mu A$

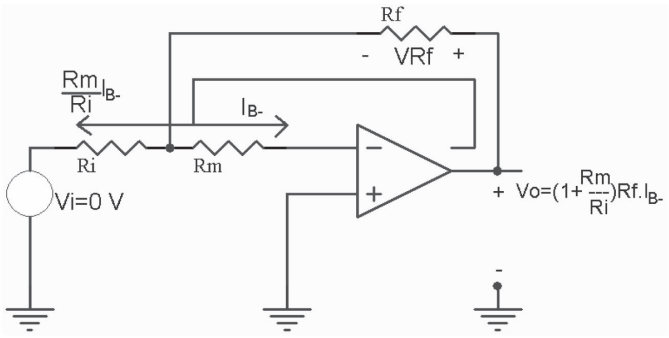
Rangkaian pada Gambar 6.3 mempunyai tegangan *output* yang sama yaitu, $Vo = R_f.I_{B-}$. Tidak ada arus yang melewati Ri karena kedua ujung Ri mempunyai tegangan nol. Jadi, seluruh arus bias yang besarnya I_{B-} melewati Rf.



Gambar 7.3 *Rangkaian inverting amplifier*

Penambahan sebuah tahanan pengali R_M seri dengan masukan negatif menyebabkan pengalian efek dari I_{B-} pada Vo. I_{B-} menimbulkan suatu penurunan tegangan melintasi R_M. Arus Ri dan I_{B-} semuanya melalui Rf sehingga besarnya Vo semakin besar yaitu $Vo \approx 11.Rf.I_{B-}$.

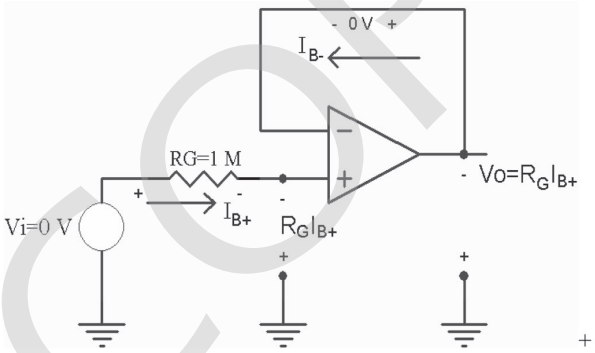
COPY



Gambar 7.4 *Efek arus bias masukan (-) atau pada tegangan output*

7.4.2 Efek Arus Bias Masukan (+)

Pada Gambar 6.5, tegangan *output*nya seharusnya sama dengan nol karena tegangan input Vi sama dengan nol. Kenyataannya, tegangan *output* tidak sama dengan nol karena adanya arus bias masukan positif (I_{B+}) yang melewati tahanan dalam (R_G) dari sumber sinyal sehingga tegangan *output* sama dengan $Vo = R_G.I_{B+}$.



Gambar 7.5 *Efek arus bias masukan (+) pada tegangan output*

Contoh 7.3

Nilai dari $R_G = 1M\Omega$ dan $Vo = 0{,}2$volt.

Carilah arus bias masukan positif (I_{B+})!

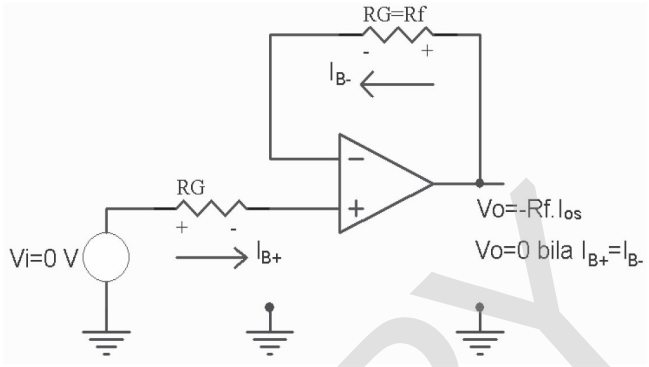
Penyelesaian: $I_{B+} = \dfrac{Vo}{R_G} = \dfrac{0{,}2V}{1M\Omega} = 0{,}2\mu A$

7.5 Efek Arus Offset pada Tegangan *Output*

7.5.1 Arus Kompensasi pada Pengikut Tegangan

Apabila nilai I_{B+} dan I_{B-} sama besar maka tidak menghasilkan efek pada tegangan *output* dan apabila tegangan masukan sama dengan nol maka tegangan *output*-nya sama dengan nol. Rangkaian pengikut tegangan

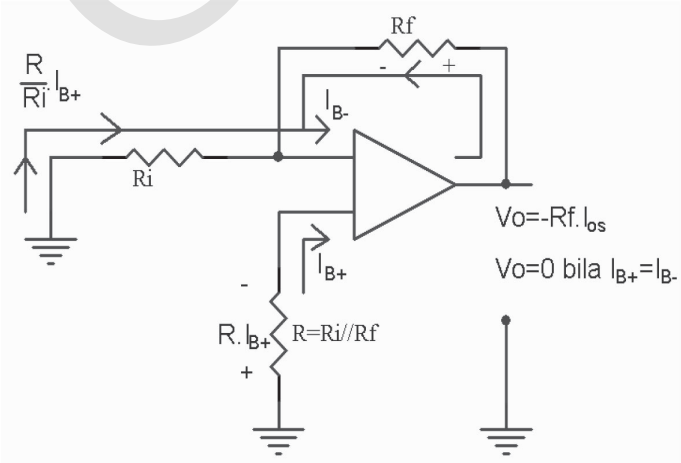
(*voltage follower*) pada Gambar 6.5, arus bias I_{B+} mengalir melalui resistansi dalam (R_G) dari sinyal masukan. Apabila pada bagian umpan balik (*feed back*) dipasang tahanan *feedback* (Rf) maka akan ada tegangan melintas sebesar $I_{B-}.Rf$. Apabila nilai Rf dan R_G sama dan nilai I_{B+} sama dengan I_{B-} maka tegangan pada kedua resistor sama sehingga menghasilkan tegangan *output* sama dengan nol. Jika nilai I_{B+} tidak sama dengan I_{B-} maka tegangan *output* Vo merupakan perkalian R_G dengan selisih arus bias atau $Vo = R_G.I_{OS}$.



Gambar 7.6 *Rangkaian voltage follower yang terkompensasi*

7.5.2 Arus Kompensasi pada Penguat

Untuk mengurangi gangguan pada tegangan *output* karena adanya arus bias pada *inverting amplifier* maupun pada *noninverting amplifier* maka ditambahkan tahanan kompensasi sebesar R seperti pada Gambar 6.6. Apabila sinyal masukan sama dengan nol maka nilai tegangan *output* Vo tergantung dari Rf dan I_{OS}. Tahanan R disebut tahanan kompensasi arus dan nilainya merupakan gabungan Ri paralel dengan Rf atau $R = Ri // Rf = \frac{Ri.Rf}{Ri + Rf}$.



Gambar 7.7 *Kompensasi untuk rangkaian amplifier*

COPY

Contoh 7.4

Carilah nilai R apabila (a)Nilai Rf = 100KΩ dan Ri = 10KΩ, (b)Nilai 100KΩ dan Ri = 100KΩ!

Penyelesaian:

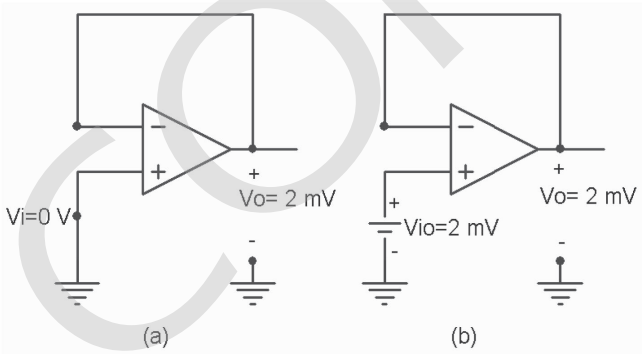
(a) $R = \frac{Rf.Ri}{Rf+Ri} = \frac{100.(10)}{100+10} = 9{,}1\text{K}\Omega$

(b) $R = \frac{Rf.Ri}{Rf+Ri} = \frac{100.(100)}{100+100} = 50\text{K}\Omega$

7.6 Tegangan Offset Masukan

7.6.1 Definisi dan Model

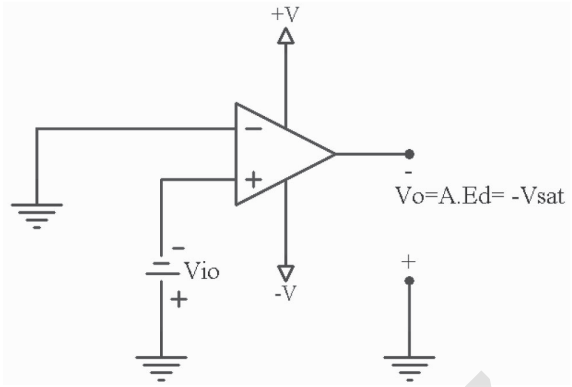
Pada Gambar 6.7, tegangan *output* seharusnya sama dengan nol karena tegangan masukannya sama dengan nol, tetapi tidak demikian yaitu tegangan *output* Vo = 2 mV yang disebabkan karena adanya ketidak-setimbangan internal dari op-amp. Ketidaksetimbangan yang mengakibatkan tegangan *output* sama dengan 2 mV dimodelkan dengan sumber dc yang serial dengan masukan positifnya. Tegangan dc dimodelkan dengan sebuah baterai dan dinamakan tegangan offset masukan Vio.



Gambar 7.8 *(a)Vo seharusnya nol karena Vi sama dengan nol (b)Gangguan Vo karena model Vio seri masukan (+)*

7.6.2 Efek Tegangan Offset Masukan pada Tegangan Keluaran

Besarnya tegangan Vio harga penguatan (*gain*) *open loop* yang besar dari op-amp membuat tegangan *output* (Vo) menuju negatif saturasi. Besar dan polaritas dari Vio untuk op-amp bisa berbeda-beda.



Gambar 7.9 *Tegangan Vio membuat tegangan output Vo = -Vsat*

7.6.3 Pengukuran Tegangan Offset Masukan

Apabila arus bias diabaikan maka dapat dilakukan besarnya Vio yaitu dengan membuat Vi sama dengan nol maka besarnya Vo apabila Vio masuk pada kaki masukan positif adalah

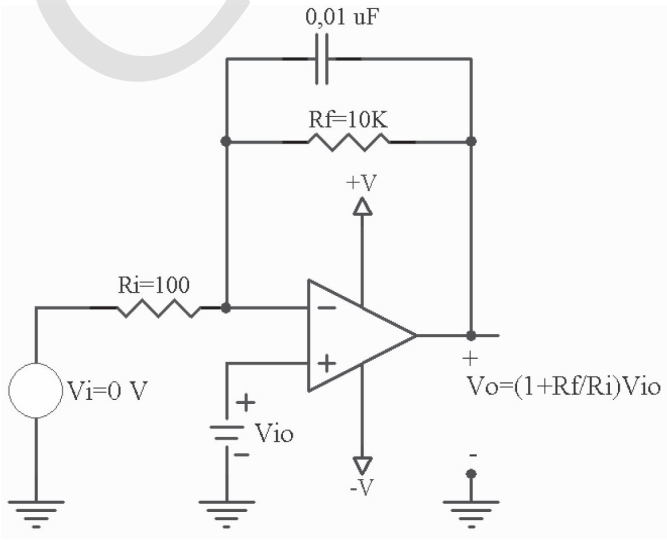
$$Vo = Vio\left(1+\frac{Rf}{Ri}\right)$$

Pasang sebuah kapasitor melintas Rf untuk mendapatkan Vo yang minim gangguan.

Contoh 7.5

Carilah nilai besarnya Vo apabila Rf = 10KΩ dan Ri = 100Ω dan besarnya Vio = 1*mV*.

Penyelesaian: $Vo = Vio\left(1+\frac{Rf}{Ri}\right) = (1mV)\left(1+\frac{10.000}{100}\right) = 101mv$



Gambar 7.10 *Tegangan Vo akibat tegangan Vio*

COPY

7.7 Mengenolkan Tegangan Offset dan Arus Bias

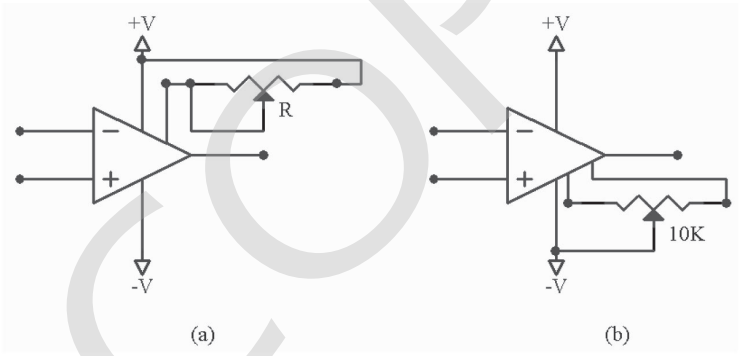
7.7.1 Urutan Perancangan atau Analisis

Untuk meminimalkan tegangan kesalahan pada tegangan *output* ikutilah urutan ini:

1) Pilihlah tahanan pengompensasi arus bias yang sesuai,
2) Buat rangkaian untuk meminimalkan efek tegangan offset masukan sesuai data produsennya,
3) Lakukan prosedur mengenolkan tegangan *output* yang telah diberikan.

7.7.2 Rangkaian Nol untuk Tegangan Offset

Salah satu cara untuk mengompensasi efek tegangan offset maupun arus offset masukan adalah dengan memasukkan tegangan kecil ke masukan (-) atau masukan (+) yaitu dengan menggunakan prinsip rangkaian pembagi tegangan dengan rangkaian tahanan pembagi. Rangkaian menambah jumlah komponen dan lebih mahal sehingga lebih baik melihat lembaran data (*data sheet*) op-amp yang diberikan oleh produsennya untuk setiap jenis op-amp. Para ahli dari produsen op-amp telah merancang rangkaian untuk meminimalkan kesalahan pada tegangan *output* yang disebabkan oleh tegangan offset dan arus bias masukan.



Gambar 7.11 *Rangkaian untuk mengenolkan tegangan offset masukan* (a)Tahanan penyesuai antara 0 – 50 K (b) Penyesuai tegangan offset pada IC 741

7.7.3 Prosedur Mengenolkan pada Tegangan Output

Rangkaian LPF-20 dB/dec dengan menggunakan komponen semikonduktor (op-amp) sebagai berikut. Op-amp berfungsi sebagai *buffer* (penyangga), sedangkan rangkaian depannya adalah sebuah filter pasif dari rangkaian R-C. Rangkaian filter R-C apabila berdiri sendiri maka impedansi *output*-nya akan selalu berubah apabila frekuensi sinyal *input* berubah. Apabila digabung dengan rangkaian *buffer* maka impedansi *output*-nya menjadi tetap dan nilainya kecil karena sama dengan impedansi dari op-amp.

7.8 Drift

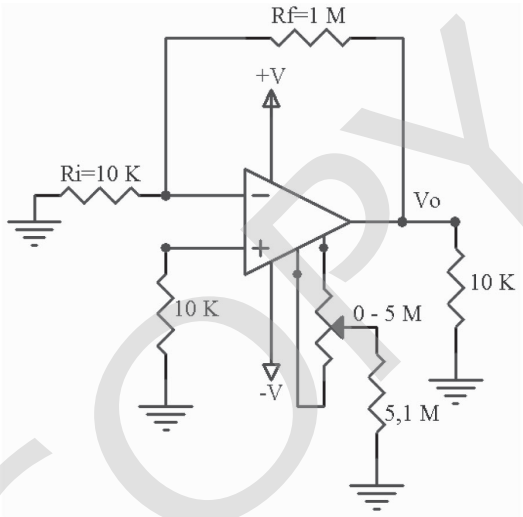
Selama ini prosedur untuk mengenolkan tegangan *output* dengan memasang tahanan kompensasi arus bias yang dipasang seri pada masukan positifnya dan tahanan penyesuai tegangan offset. Prosedur mengenolkan ini berlaku hanya pada satu suhu dan satu waktu saja. Arus offset berubah bersama waktu karena umur komponen-

COPY

komponennya dan karena perubahan suhu di dalam op-amp-nya. Perubahan arus offset dan tegangan offset yang disebabkan oleh suhu disebut drift. Drift untuk arus offset dinyatakan dalam *nA*/°*C* (nano ampere per derajat celcius). Sedangkan drift untuk tegangan offset dinyatakan dalam μ*V*/°*C*(mikro volt per derajat celcius).

Contoh 7.6

Sebuah op-amp tipe 301 mempunyai data drift. Bila suhu berubah dari 25°*C* menjadi 75°*C*. I_{OS} berubah sebesar 0,3*nA*/°*C* dan Vio berubah sebesar 30μ*V*/°*C*. Misalkan pada suhu 25°*C*, tegangan Vo telah disetel kemudian lingkungan sekitar sebesar 75°*C*. Carilah kesalahan tegangan *output* (Vo) karena drift dalam (a)Vio dan (b) I_{OS}!



Gambar 7.12 *Rangkaian akibat Vio dan Ios*

Penyelesaian:

(a) Vio akan berubah sebesar

$$\pm\frac{30\mu V}{^{o}C}(75-25)^{o}C = \pm 1{,}5mV$$

Perubahan Vo akibat perubahan Vio adalah

$$1{,}5mV\left(1+\frac{Rf}{Ri}\right)=1{,}5mV(101)\approx\pm 150mV$$

(b) I_{OS} akan berubah sebesar

$$\pm\frac{0{,}3nA}{^{o}C}\times 50^{o}C = \pm 15nA$$

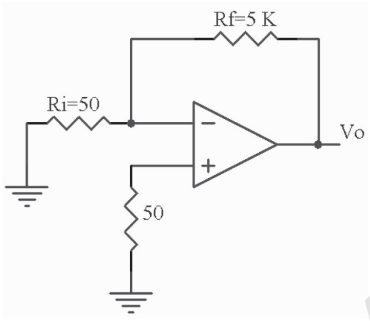
Perubahan Vo akibat perubahan I_{OS} adalah $\pm 15nA \times Rf = \pm 15nA.(1M\Omega) = \pm 15mV$

Perubahan Vo akibat Vio maupun I_{OS} bisa saling ditambahkan maupun dikurangi karena perubahan Vo terburuk yang mungkin adalah +165 mV atau -165 mV dari nilai 0 pada suhu 25 celcius.

COPY

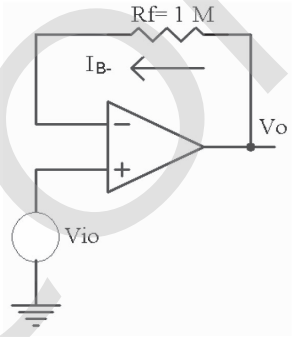
7.9 Pengukuran Tegangan Offset dan Arus Bias

1) Pengukuran tegangan offset masukan (Vio)



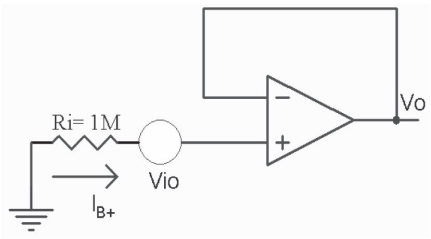
$$V_{io} = \frac{Vo}{\frac{(Rf + Ri)}{Ri}} = \frac{Vo}{101}$$

2) Pengukuran arus bias masukan negatif



$$V_o = V_{io} + Rf.I_{B-} \text{ atau } I_{B-} = \frac{Vo - Vio}{Rf}$$

3) Pengukuran arus bias masukan positif



$$V_o = V_{io} - Rf.I_{B+} \text{ atau } I_{B+} = -\frac{Vo - Vio}{Rf}$$

COPY

Contoh 7.7

Sebuah op-amp tipe 741 dengan data resistansi seperti yang terlihat.

1) Carilah V_{oi} apabila $Vo = 0{,}421V$.
2) Carilah I_{B-} apabila $Vo = 0{,}097V$.
3) Carilah I_{B+} apabila $Vo = -0{,}082V$

Penyelesaian:

$$1)\ V_{io} = \frac{Vo}{\frac{(Rf+Ri)}{Ri}} = \frac{Vo}{101} = \frac{0{,}421V}{101} = 4{,}1mV$$

$$2)\ I_{B-} = \frac{Vo - V_{io}}{Rf} = \frac{(97-4{,}1)mV}{1M\Omega} = 93nA$$

$$3)\ I_{B+} = -\frac{Vo - V_{io}}{Rf} = -\frac{(-82-4{,}1)mV}{1M\Omega} = 86nA$$

$$4)\ I_{OS} = I_{B+} - I_{B-} = 86 - 93 = -7nA$$

Latihan Soal

1) Nilai dari $I_{B+} = 0{,}2\mu A$ dan $I_{B-} = 0{,}1\mu A$. Carilah (a) arus bias rata-rata (I_B), (b) arus offset (I_{OS}) !
2) Bila Rf = 1MΩ dan Vo = 0,2V. Carilah I_{B-}!
3) Nilai dari $Rf = Rg = 100K\Omega$ dan $I_{B+} = 0{,}3\mu A$ dan $I_{B-} = 0{,}2\mu A$, Carilah V_O!
4) Nilai dari $Rf = Ri = 25K\Omega$ dan $R = 100K\Omega$. Jika $I_{OS} = 0{,}1\mu A$, carilah V_o !
5) Nilai VO = $200mV$, carilah V_{io}!

COPY

COPY

BAB 8

Parameter Op-Amp Mode AC (Lepar Pita (*Bandwidth*), Laju Ubah (*Slew Rate*), Gangguan (*Noise*), Kompensasi Frekuensi (*Frequency Compensation*))

COPY

8.1 Pendahuluan

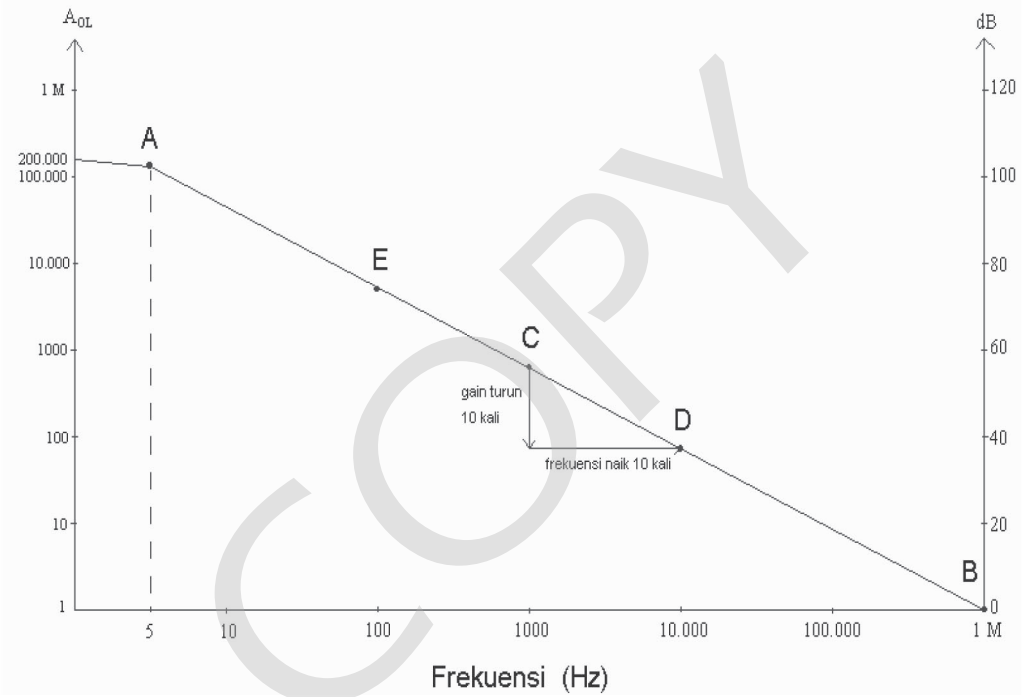
Penguat Operasional (*operational amplifier*) atau Op-Amp apabila mendapat sinyal ac, perlu diperhatikan apakah tegangan *output*-nya sinyal kecil (di bawah tegangan puncak 1 volt) atau sinyal besar (di atas tegangan puncak 1 volt). Jika sinyal kecil maka parameter op-amp yang membatasi penampilan adalah gangguan (*noise*) dan tanggapan frekuensi (*frequency response*). Jika sinyal keluaran ac besar maka parameter dari op-amp adalah pembatasan laju ubah (*slew rate*). Arus bias dan tegangan offset yang memengaruhi operasi dc dari op-amp tidak berlaku apabila op-amp beroperasi pada daerah ac karena pada rangkaian dipasang kapasitor di mana kapasitor berfungsi memblokir arus dc dan melewatkan ac.

8.2 Tanggapan Frekuensi (*Frequency Response*) dari Op-Amp

8.2.1 Kompensasi Frekuensi Dalam

Banyak jenis op-amp yang oleh produsennya sudah dilengkapi dengan kompenssi dalam yaitu dengan memasang kapasitor dalam op-amp yang biasanya 30 pF. Kapasitor ini mencegah agar op-amp tidak berosilasi pada frekuensi tinggi. Osilasi dicegah dengan menurunkan penguatan (*gain*) op-amp seiring dengan naiknya frekuensi. Dari rangkaian dasar didapatkan bahwa reaktansi sebuah kapasitor adalah turun seiring dengan naiknya frekuensi (berbanding terbalik). Jika frekuensinya naik 10 kali maka *gain* tegangan turun 10 kali. Perubahan frekuensi sebesar 10 kali dina-

makan satu decade. Hubungan *gain open loop* dengan frekuensi oleh produsennya dinyatakan dalam bentuk kurva (grafik). Gambar 7.1 menunjukkan bahwa titik A menunjukkan frekuensi *cut-off* karena gain tegangannya 0,707 dari *gain* frekuensi rendahnya. Karena itu, *gain* pada titik A sekitar 140.000 atau 0,707x200.000. Titik C dan D memperlihatkan penurunan *gain* tegangan sebesar 10 kali karena frekuensinya naik 10 kali atau satu decade. Sumber vertikal sebelah kanan adalah *gain* tegangan dalam decibel (dB). Gain tegangannya turun sebesar 20 dB apabila frekuensinya naik satu decade. Oleh karena itu, grafik A ke B dinyatakan sebagai meluncur pada 20 dB/decade. Bisa juga dinyatakan dalam 6 dB/oktaf di mana "oktaf" adalah perubahan frekuensi sebesar 2 kali atau setiap frekuensinya naik 2 kali maka *gain* tegangan turun sebesar 6 dB.



Gambar 8.1 *Grafik Gain open loop (AoL) terhadap frekuensi*

8.2.2 Lebar Pita *Gain* Satu (*Unity Gain Bandwidth*)

Pada Gambar 7.1, titik B adalah lebar pita *gain* satu dari op-amp karena titik tersebut pada frekuensi di mana gain atau penguatan *open loop* sama dengan 1. Beberapa op-amp tidak memberikan data tentang lebar pita *gain* satu sebagai gantinya adalah waktu naik tanggapan transien (*transient response rise time*). Lebar pita (*bandwidth*) dihitung dari waktu naik sebesar: $B = \frac{0{,}35}{waktu\ naik} = \frac{0{,}35}{t_r}$.

Contoh 8.1

Sebuah op-amp mempunyai waktu naik (t_r) sebesar 0,35μdetik. Carilah lebar pita (*bandwidth*) sinyal kecil atau *gain* satu!

Penyelesaian: $B = \frac{0{,}35}{0{,}35\mu detik} = 1MHz$

COPY

Contoh 8.2

Berapa gain tegangan *open loop* (A_{OL}) pada frekuensi 1 MHz?

Penyelesaian: Menurut definisi B maka *gain* tegangan tersebut besarnya 1.

Contoh 8.3

Berapa *gain* tegangan *open loop* (A_{OL}) pada frekuensi 100 KHz?

Penyelesaian: Menurut definisi dari grafik jika frekuensinya turun sebesar 10 kali (dari 1 MHz ke 100 KHz) maka *gain* tegangan tersebut turun sebesar 10 kali sehingga besarnya 10.

Contoh 8.4

Berapa *gain* tegangan *open loop* (A_{OL}) dari op-amp yang mempunyai lebar pita *gain* satu sebesar 1,5 MHz pada sinyal masukan dengan frekuensi 1 KHz.

Penyelesaian:

$$AOL\ pada\text{-}f = \frac{\text{lebar - pita - gain - satu}}{\text{frekuensi - sinyal - masukan}}$$

$$AOL = \frac{1{,}5\ \text{MHz}}{1\text{KHz}} = 1500$$

8.2.3 Waktu Naik (*Rise Time*)

Apabila sinyal masukan (Vi) mengalami perubahan pada penguat *gain* satu yaitu berubah dari 0 V menjadi 20 mV dalam waktu 0 detik maka secara praktis tegangan keluaran (Vo) akan berubah dari 0 V ke 20 mV dalam beberapa nano detik karena sinyal masukan akan menjalar ke keluaran melalui beberapa transistor. Waktu naik (*rise time*, t_r) didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan oleh tegangan *output* untuk naik dari 10% nilai akhir sampai 90% nilai akhirnya.

Contoh 8.5

Berapa waktu naik (t_r) dari op-amp tipe 741 untuk tegangan *output*-nya berubah dari 0 V sampai 20 mV apabila waktu naiknya 0,35µdetik.

Penyelesaian: Sesuai dengan definisinya maka dibutuhkan waktu 0,35µdetik oleh tegangan *output* untuk berubah dari 2 mV ke 18 mV.

8.3 Gain Penguat dan Tanggapan Frekuensi (*Frequency Response*)

8.3.1 Efek *Gain Open Loop* (*Aol*) pada *Gain Close Loop* (*Acl*) dari Op Amp

Perlu diperhatikan pengaruh *gain open loop* (*AoL*) dapat memengaruhi *gain close loop* (*AcL*) pada sebuah penguat dengan tegangan sinyal dc (frekuensi nol). Dari yang sudah diketahui bahwa *gain close loop* (*AcL*) dipengaruhi oleh tahanan luar saja. Sebenarnya, *gain close loop* (*AcL*) dipengaruhi oleh tahanan luar dan *gain open loop* (*AoL*). *Gain close loop* pada penguat tak membalik adalah

COPY

$$A_{CL}\ sebenarnya = \frac{A_{CL}\ ideal}{1 + \frac{A_{CL}}{A_{OL}} ideal}$$

Di mana: $A_{CL}\ ideal = \frac{(Rf + Ri)}{Ri}$

Untuk penguat pembalik, *gain* sebenarnya adalah

$$A_{CL}\ sebenarnya = \frac{A_{CL}\ ideal}{1 + \frac{(1 - A_{CL})}{A_{OL}} ideal}$$

Di mana: $A_{CL}\ ideal = -\frac{(Rfl)}{Ri}$

Contoh 8.6

Carilah *gain* sebenarnya dari penguat tak membalik dc jika A_{CL} ideal = 100 dan A_{OL} besarnya (a)10.000, (b)1000, (c)100, (d)10, (e) 1!

Penyelesaian:

(a) $A_{CL}\ sebenarnya = \frac{A_{CL}\ ideal}{1 + \frac{A_{CL}}{A_{OL}} ideal} = \frac{100}{1 + \frac{100}{10.000}} = 99{,}0099$

(b) $A_{CL}\ sebenarnya = \frac{100}{1 + \frac{100}{10.000}} = 90{,}9$

(c) $A_{CL}\ sebenarnya = \frac{100}{1 + \frac{100}{100}} = 50$

(d) $A_{CL}\ sebenarnya = \frac{100}{1 + \frac{100}{10}} = 9{,}0$

(e) $A_{CL}\ sebenarnya = \frac{100}{1 + \frac{100}{1}} = 0{,}99$

Contoh 8.7

Carilah *gain* sebenarnya dari penguat membalik dc jika A_{CL}ideal = −100 dan A_{OL} besarnya (a)10.000, (b)1000, (c)100, (d)10, (e) 1!

Penyelesaian:

(a) $A_{CL}\ sebenarnya = \frac{A_{CL}\ ideal}{1 + \frac{(1 - A_{CL})}{A_{OL}} ideal} = \frac{-100}{1 + \frac{(1 + 100)}{10.000}} = -99$

COPY

(b) A_{CL} *sebenarnya* $= \dfrac{-100}{1 + \dfrac{(1+100)}{1.000}} = -90{,}9$

(c) A_{CL} *sebenarnya* $= \dfrac{-100}{1 + \dfrac{(1+100)}{100}} = -49{,}7$

(d) A_{CL} *sebenarnya* $= \dfrac{-100}{1 + \dfrac{(1+100)}{10}} = -9{,}0$

(e) A_{CL} *sebenarnya* $= \dfrac{100}{1 + \dfrac{(1+100)}{1}} = -0{,}98$

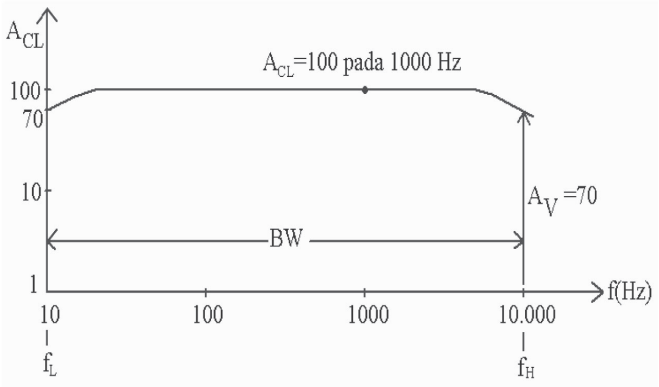
8.3.2 Hasil Kali Gain-Lebar Pita (G x B)

Salah satu *performance* dari sebuah op amp adalah hasil kali *gain* dengan lebar pitanya (*bandwidth*). GxB didapatkan dengan mengalikan *gain open loop* (*AoL*) pada frekuensi rendah dengan lebar pitanya. Sebuah op amp tipe 741 mempunyai A_{OL} = 200.000 dan lebar pitanya B = 5Hz. Jadi, G x B sama dengan GB = 200.000x5Hz = 1 MHz. Op-amp 741 ini mempunyai *gain* A_{OL} = 1 pada lebar pita 1 MHz sehingga G x B = 1 x 1 MHz = 1 MHz. Jadi, gain satu x lebar pita dari op-amp menyamai hasil kali *gain* x lebar pitanya yang dapat dinyatakan secara matematika sebagai berikut:

$$A_{CL} \times B_{\text{penguat}} = A_{OL} \times B_{\text{op-amp}}$$

8.3.3 Lebar Pita (*Bandwidth*) Sinyal Kecil

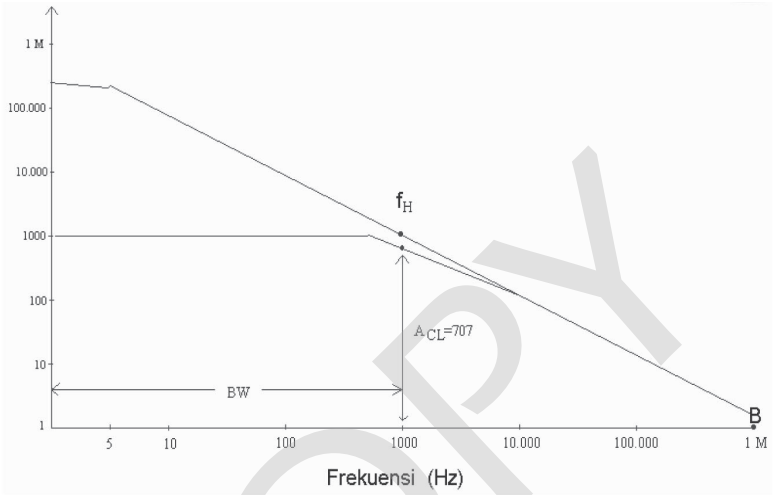
Jangkauan frekuensi dari sebuah penguat dibatasi oleh frekuensi tinggi f_H dan frekuensi rendah f_L. Pada f_L dan f_H, *gain* tegangannya turun menjadi 0,707 dari harga maksimumnya. Pada nilai *decibel*, *gain* tegangannya turun sebesar 3 dB. Lebar pita (*bandwidth*) adalah frekuensi tinggi dikurangi frekuensi rendah ($BW = f_H - f_L$). Lebar pita sinyal kecil ditentukan oleh lebar pita *gain* satu (B) dan *gain close loop* (*AcL*) dan hubungannya adalah $BW = \dfrac{B}{A_{CL}}$.



Gambar 8.2 *Lebar pita (BW) pada sinyal kecil*

COPY

Misalkan hitunglah A_{CL} dari $\frac{Rf}{Ri}=100$ dari grafik pada Gambar 7.1. Apabila ditarik garis dari kiri pada nilai 1000 maka akan memotong grafik dan apabila ditarik garis ke bawah maka ketemu frekuensi 1 KHz. *Gain close loop* di titik frekuensi ini adalah 0,707 x *gain* ideal = 0,707 x 1000 = 707. Sedangkan untuk frekuensi di atasnya maka *gain* tidak ditentukan oleh Rf dan Ri, tetapi oleh op ampnya.



Gambar 8.3 *Lebar pita (BW) dan gain close loop (AcL)*

Contoh 8.8

Lebar pita gain satu (*B*) dari op-amp tipe 741 adalah 1 MHz. Bila digunakan sebagai penguat dengan gain close loop (A_{CL}) sebesar 100, carilah lebar pita sinyal kecil (*BW*)!

Penyelesaian: $BW=\frac{B}{A_{CL}}=\frac{1\text{MHz}}{100}=10\text{KHz}$

8.4 Laju Ubah (Slew Rate)

Laju ubah (slew rate) biasa disingkat SR adalah kecepatan perubahan tegangan output pada op amp terhadap waktu dan biasanya ditulis:

$$SR=\frac{perubahan-tegangan-output}{waktu}=\frac{\Delta Vo}{\Delta t}$$

Contoh 8.9

Suatu op amp 741 mempunyai data *slew rate* sama dengan $SR=\frac{0{,}5V}{\mu\text{detik}}$ digunakan sebagai penguat. Berapa lama tegangan *output* untuk berubah sebesar 10 V?

COPY

Penyelesaian: $SR = \dfrac{perubahan - tegangan - output}{waktu} = \dfrac{\Delta Vo}{\Delta t}$

$$waktu = \frac{perubahan - tegangan - output}{SR} = \frac{10V}{0{,}5V/\mu detik} = 20\mu detik$$

8.5 Pembatasan Laju Ubah (Slew Rate) untuk Gelombang Sinus

Laju perubahan tegangan input Vi suatu gelombang sinus dengan amplitude puncak Vip tergantung pada frekuensi f dan amplitude puncak diberikan oleh . Jika laju perubahan tegangan ini lebih besar dari laju ubah dari op-amp maka akan terjadi distorsi di tegangan output. Frekuensi maksimum yang diperbolehkan supaya tidak terjadi distorsi di tegangan output adalah

$$fmaks = \frac{laju - ubah}{2\pi.Vop} = \frac{SR}{6{,}28.Vop}$$

Di mana: *f maks* adalah frekuensi maksimum dalam Hz

Vop adalah tegangan puncak *output* dalam volt

SR adalah laju ubah dalam volt per mikrodetik

Contoh 8.10

Laju ubah op-amp tipe 741 adalah 0,5V/μdetik. Supaya tegangan *output* tidak terdistorsi, berapa frekuensi maksimum apabila tegangan puncaknya (a) 10V dan (b) 1V?

Penyelesaian: (a) $fmaks = \dfrac{SR}{6{,}28.Vop} = \dfrac{0{,}5/\mu detik}{6{,}28.(10V)} = \dfrac{1}{125{,}6\mu detik} = 8Khz$

(b) $fmaks = \dfrac{SR}{6{,}28.Vop} = \dfrac{0{,}5/\mu detik}{6{,}28.(1V)} = \dfrac{1}{12{,}56\mu detik} = 80Khz$

Contoh 8.11

Op-amp tipe 741 dengan $\pm V = \pm 15$ volt dan $\pm Vsat = \pm 13$ volt. Berapa frekuensi maksimum supaya keluaran dayanya penuh pada op-amp 741?

Penyelesaian: $f_{maks}daya\ penuh = \dfrac{SR}{6{,}28.Vop} = \dfrac{0{,}5/\mu detik}{6{,}28.(13V)} = 6Khz$

8.6 Gangguan dalam Tegangan *Output*

8.6.1 Pendahuluan

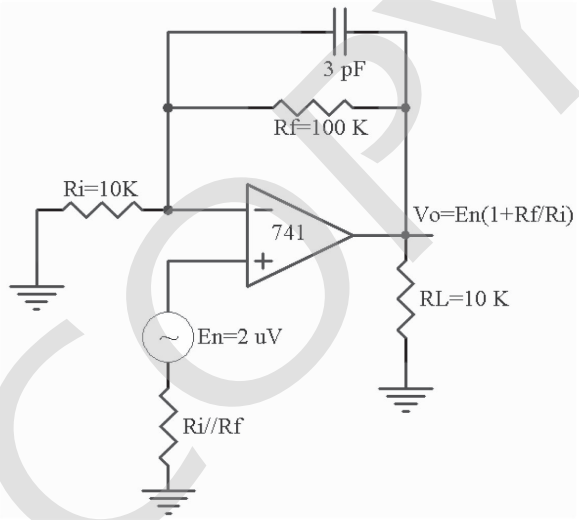
Sinyal-sinyal elektrik yang tidak diinginkan, yang ada pada tegangan *output*, dinamakan sebagai gangguan (*noise*). Drift dan offset dapat dianggap sebagai gangguan yang berfrekuensi rendah. Jika pada tegangan *output* dari sebuah penguat diperhatikan maka ada tegangan gangguan yang bersifat acak yang disebut *hash*. Frekue-

COPY

nsi dari tegangan gangguan ini berkisar dari 0,01 Hz sampai MHz. Gangguan dibangkitkan oleh divais elektrik dan pengaturnya. Pada sebuah automobile terdapat busi, regulator, motor kipas, pengondisi udara, generator yang semuanya menghasilkan gangguan. Bahkan, lampu depan dan lampu luar yang dihidupkan maupun dimatikan akan mengakibatkan perubahan arus secara tiba-tiba yang membangkitkan gangguan. Gangguan ini dinamakan gangguan luar yaitu di luar op amp yang bisa diatasi dengan teknik konstruksi dan pemilihan rangkaian yang tepat.

8.6.2 Gangguan dalam Rangkaian Op Amp

Apabila tidak ada gangguan dari luar maka tegangan *output* masih mungkin mengalami gangguan yang disebabkan dari op amp itu sendiri dan gangguan ini dinamakan gangguan dalam yang dimodelkan dengan tegangan gangguan (*noise*) E_n yang seri dengan masukan positifnya op amp. Misalkan op amp tipe 741 mempunyai gangguan dalam sebesar 2μV.



Gambar 8.4 *Tegangan gangguan yang seri dengan masukan positif op amp*

8.6.3 Gain Gangguan (Noise Gain)

Gain tegangan gangguan (noise) diperkuat persis seperti tegangan offset, yaitu gain tegangan gangguan sama seperti gain sebuah penguat tak membalik (noninverting amplifier) sebesar:

$$Gain - gangguan = \left(1 + \frac{Rf}{Ri}\right)$$

Langkah-langkah untuk meminimalkan kesalahan tegangan *output* akibat gangguan:

1. Hindari nilai tinggi dari tahanan Ri an Rf,
2. Pasang kapasitor kecil (3 pF) melintasi Rf untuk frekuensi tinggi,
3. Pilih Ri sekitar 10 K atau sedikit di bawahnya.

COPY

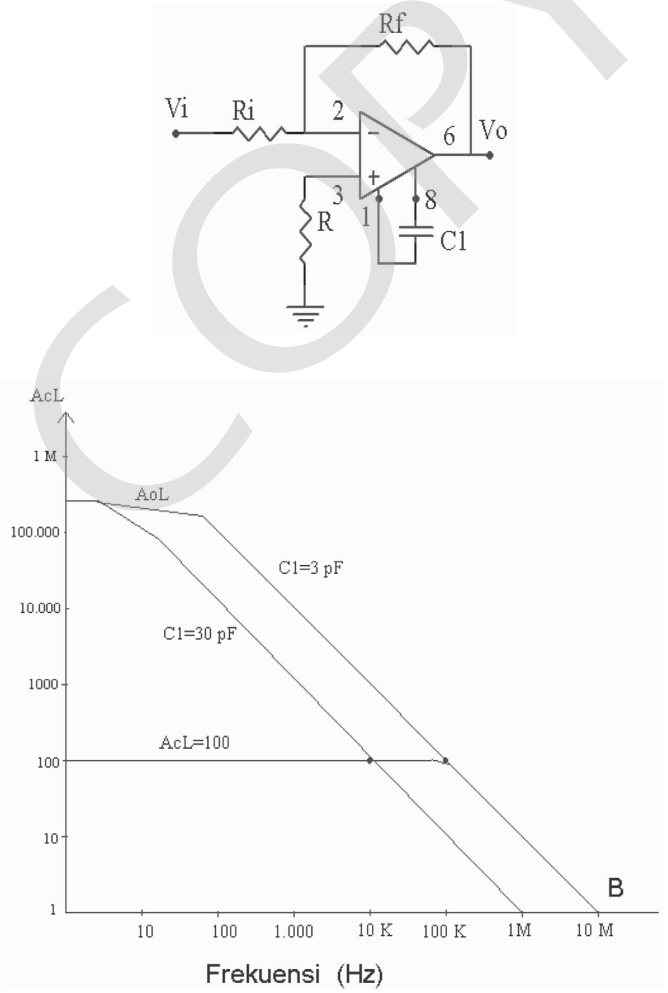
8.7 Kompensasi Frekuensi Luar

8.7.1 Kebutuhan akan Kompensasi Frekuensi Luar

Op amp dengan kompensasi frekuensi dalam adalah stabil terhadap frekuensi-frekuensi sinyal dan tidak berosilasi, tetapi mempunyai kekurangan dalam hal lebar pita (*bandwidth*) yang terbatas, laju ubah (*slew rate*) yang rendah. Op amp dengan kompensasi dalam memang berguna pada frekuensi audio, tetapi tidak untuk frekuensi tinggi. Para produsen op amp menyediakan antara satu sampai tiga terminal untuk pemasangan kapasitor kompensasi frekuensi.

8.7.2 Kompensasi Kapasitor Tunggal

Respons frekuensi dari op amp serba guna yaitu menghubungkan kapasitor C1 sebesar 3 pF pada kaki nomor 1 dan nomor 8. Apabila C1 dinaikkan menjadi 30 pF maka lebar pita frekuensi (band width) menjadi kecil sebesar sepersepuluhnya.

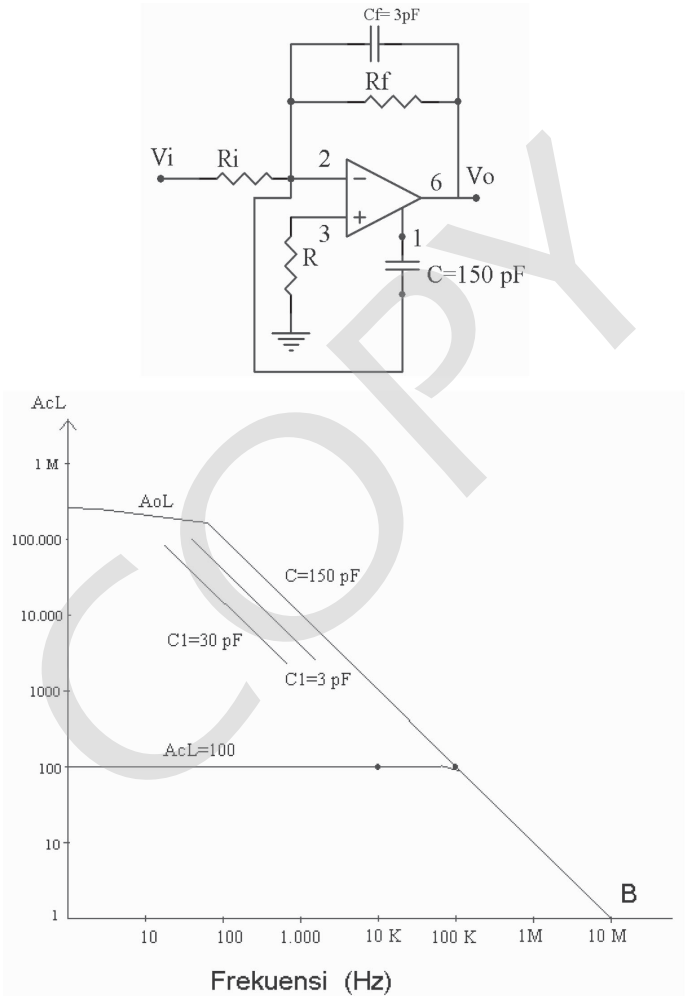


Gambar 8.5 *Kapasitor kompensasi luar untuk memperlebar tanggapan frekuensi*

COPY

8.7.3 Kompensasi Frekuensi Umpan Maju

Ada banyak jenis kompensasi frekuensi di antaranya yang terkenal adalah kompensasi dua kapasitor dan kompensasi umpan maju. Kompensasi umpan maju dengan memasang kapasitor C pada kaki terminal (-) *input* dengan kaki nomor 1. Diperlukan sebuah kapasitor kecil Cf yang melintasi Rf untuk menjamin kestabilan frekuensi.



Gambar 8.6 *Kapasitor kompensasi umpan maju untuk memperlebar tanggapan frekuensi*

COPY

Latihan Soal

1) Sebuah op-amp mempunyai waktu naik (t_r) sebesar 0,5µdetik. Carilah lebar pita (*bandwidth*) sinyal kecil atau gain satu!
2) Berapa gain tegangan *open loop* (A_{OL}) pada frekuensi 2 MHz?

3) Berapa *gain* tegangan *open loop* (A_{OL}) pada frekuensi 200 KHz?
4) Berapa *gain* tegangan *open loop* (A_{OL}) dari op-amp yang mempunyai lebar pita *gain* satu sebesar 1,5 MHz pada sinyal masukan dengan frekuensi 2 KHz?
5) Berapa waktu naik (t_r) dari op-amp tipe 741 untuk tegangan *output*-nya berubah dari 0 V sampai 20 mV apabila waktu naiknya 0,5µdetik?
6) Carilah *gain* sebenarnya dari penguat tak membalik dc jika $A_{CL}ideal = 200$ dan A_{OL} besarnya (a)10.000, (b)1000, (c)100, (d)10, (e) 1!
7) Carilah *gain* sebenarnya dari penguat membalik dc jika $A_{CL}ideal = 200$ dan A_{OL} besarnya (a)10.000, (b)1000, (c)100, (d)10, (e) 1!
8) Lebar pita *gain* satu (*B*) dari op-amp tipe 741 adalah 1 MHz. Bila digunakan sebagai penguat dengan *gain close loop* (A_{CL}) sebesar 200, carilah lebar pita sinyal kecil (BW)!
9) Suatu op amp 741 mempunyai data *slew rate* sama dengan $SR = \frac{1V}{\mu detik}$ digunakan sebagai penguat. Berapa lama tegangan output untuk berubah sebesar 10 V?
10) Laju ubah op-amp tipe 741 adalah 1V/µdetik. Supaya tegangan *output* tidak terdistorsi, berapa frekuensi maksimum apabila tegangan puncaknya (a) 10V dan (b) 1V?
11) Op-amp tipe 741 dengan $\pm V = \pm 15$ volt dan $\pm Vsat = \pm 13$ volt . Berapa frekuensi maksimum supaya keluaran dayanya penuh pada op-amp 741?

COPY

COPY

DAFTAR PUSTAKA

Arpad Barna, Dan I. Porat, *Operational Amplifiers*, second edition, 1989, John Wiley & Sons.

Joseph J. Carr, *Sensors and Circuits*, 1993, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.

Paul M. Chirlian, *Analysis and Design of Integrated Electronic Circuits*, second edition, 1987, John Wiley & Sons.

Richard Aston, *Principles of Biomedical Instrumentation and Measurement*, Merrill Publishing Company, 1991, Singapore.

Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll, *Operational Amplifier and Linear Integrated Circuit*, 1982, Prentice-Hall, Inc.

Timothy J. Maloney, *Industrial Solid-State Electronics Devices And Systems*, second edition, 1979, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.

_____, *National Operational Amplifiers Data Book*, 1995, National Semiconductor.

COPY

TENTANG PENULIS

COPY

Pujiono, dilahirkan di Nganjuk Jawa Timur. Pendidikan dasar (SD) sampai pendidikan menengah (SMPN 1) dan (SMAN 2) dilalui di kota Nganjuk. Lulus SMA tahun 1987, penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Jurusan Teknik Elektro – ITS (Institut Teknologi Sepuluh Nopember) di Surabaya. Penulis mengambil bidang studi Elektronika dan lulus tahun 1993. Sejak tahun 1993 sampai sekarang menjadi dosen tetap di Jurusan Teknik Elektro – ITS. Penulis melanjutkan pendidikan S2 tahun 2003 di Jurusan Teknik Elektro – ITS mengambil bidang studi Elektronika Medika. Penulis pernah menjadi dosen tidak tetap di beberapa perguruan tinggi di kota Surabaya dan Malang. Penulis juga pernah menjadi konsultan perusahaan percetakan di Kudus Jateng dan justru mendapatkan ilmu pengetahuan yang banyak dari tempat tersebut. Penulis selama ini aktif mendisain rangkaian dan membuat alat-alat elektronika, puncaknya pada awal tahun 2000 dengan banyak berdirinya warung telekomunikasi (wartel), penulis dengan beberapa rekan dosen yang lain menjadi penyedia peralatan wartel dengan merek MEGAKOM dan RAJAWALI. Setelah wartel banyak yang tutup, penulis beralih pada perancangan peralatan elektronika terapan (mesin antrian yang berbasis computer maupun yang stand alone berbasis mikrokontroller) dan aneka display elektronik (led moving sign dan papan valas (forex board) dari seven segment display).